ÉTUDE

AUTOMATISATION
des AVIONS de TRANSPORT
à l'HORIZON 2050

Éléments de base

du Dossier N°42 de l'AAE

« Aviation plus automatique, interconnectée, à l'horizon 2050 »

« AAE / Commission Aéronautique Civile »

© AAE - 2018
Tous droits réservés

Achevé d'imprimer mai 2018 par
Imprimervotrelivre.com
France

ISBN 978-2-913331-75-4

Dépôt légal mai 2018

AAE
Académie de l'air et de l'espace
Ancien Observatoire de Jolimont
1 avenue Camille Flammarion
31500 Toulouse - France
Tel : +33 (0)5 34 25 03 80 - Fax : +33 (0)5 61 26 37 56
contact@academie-air-espace.com
www.academie-air-espace.com

Table des matières

INTRODUCTION 11

LISTE DES LIVRETS.....13

LIVRET 1 : SECURITE ACTUELLE DES VOLS ET OBJECTIFS D'AMELIORATIONS 15

Jean BROQUET (Membre de l'AAE) , Xavier CHAMPION (Expert invité)

EVOLUTION du TAUX d'ACCIDENTS MORTELS 17

OBJECTIFS GLOBAUX de REDUCTION du TAUX d'ACCIDENTS MORTELS d'ici à 2050 18

OBJECTIF SPECIFIQUE d'AMELIORATION de la SECURITE du PILOTAGE d'ici à 2050 20

Le CAS des JETS de FABRICATION OCCIDENTALE : AXES d'AMELIORATIONS POTENTIELLES de la SECURITE des VOLS..... 21

Taux d'accidents mortels par génération d'avions 22
Perte de contrôle (LOC)..... 23
Collision avec le sol (CFIT) 24
Sortie de piste à l'atterrissage (RE) 25
Accidents inexpliqués..... 25
Introduction des avions de nouvelle génération..... 26

Références 26

LIVRET 2 : CONSIDERATIONS GENERALES SUR LES AUTOMATISMES ET LEUR HISTOIRE.....27

Pierre CALVET (Expert invité)

Avant-propos 28

Chapitre 1 : CONSIDERATIONS sur les AUTOMATISMES de BORD 29

Leur évolution jusqu'à l'ère du numérique 29
Plus d'automatismes ou « tout automatique », Vers l'autonomie ? 30
Premiers rappels historiques, jusqu'aux années 70..... 35
Les pilotes dans la troisième phase d'automatisation 37
Pourquoi avoir voulu automatiser ?..... 38
Pourquoi automatiser *toujours plus* ?..... 40
Quel sens donner à « plus d'automatisation » ?..... 41
Limitations actuelles des automatismes 43
Maintien du rôle des pilotes dans la continuité historique..... 43
Constantes historiques des automatismes aéronautiques 45
Synthèse..... 48

Chapitre 2 : La REVOLUTION NUMERIQUE en AVIONIQUE 49
Eléments historiques 49
Comment (di)gérer le millefeuille 51
Panorama des équipements actuels 56
Quelques sujets d'actualité 60
Conclusion : Les hommes et l'avionique 61

Chapitre 3 : En Conclusion, RAPPELS et PERSPECTIVES 62
Evolutions de la formation des équipages 62
Que peut-on espérer de plus ? 62
Frontière Homme-machine 63
Comment orienter les progrès ? 64
Continuité ou ruptures, rôle de la Recherche 65
Conclusion 66

Annexe 1 : Quelques rappels historiques 67

Annexe 2 : Vers l'autonomie ou le télé-pilotage ? 70

Annexe 3 : Automatisation dans les transports terrestres et maritimes 71

Annexe 4 : Actif ou passif, et conception centrée homme ou machine 72

Annexe 5 : Entrées-sorties d'automatismes passifs et actifs 73

Annexe 6 : Blocs fonctionnels d'un automatisme 76

Annexe 7 : Exemples d'automatismes récents 77

Annexe 8 : Glass cockpit 79

Annexe 9 : Les hommes et leurs avions, hier et aujourd'hui 81

Annexe 10 : Enjeux et défis de l'automatisation 83

Glossaire des abréviations 84

LIVRET 3 : LA TRANSITION CYBERNETIQUE DU TRANSPORT AERIEN DE PASSAGERS : *UNE APPROCHE THEORIQUE ELEMENTAIRE ET PHILOSOPHIQUE* 87

Jean-Claude RIPOLL (Membre de l'AAE)

Résumé 88

INTRODUCTION 89

AUTOMATISATION DE LA CONDUITE DU VOL 92
Définitions 93
Analytique du vol 93
Identification succincte des modes de conduite 95
Les cinq modes de conduite du vol en détail 96
Hiérarchie des modes de conduite du vol 100

Prospective 101
Conclusions du chapitre 101

HUMAIN vs MACHINE 102
Irréductibilité de l'humain et de la machine 102
Humanité de l'humain 103
Caractères de la machine 104
Humain ET machine 104
L'humain dans la boucle 105
Boucle OODA 106
La boucle selon le mode de conduite du vol 107
Recommandations 109

AUTOMATISATION ET SECURITE 109
Priorité permanente : le maintien en bon état 110
La surveillance des processus 110
Continuité de l'information 110
La sécurité directe du vol 111
Traitement de l'inattendu 111
Traitement de l'imprévu 112
Conclusion du chapitre 112

L'AUTOMATISATION DANS LE SYSTEME GLOBAL 113
Espaces d'évolution 113
Objectifs de l'automatisation 114
Classement des automatismes 114
Informations 116
Le modèle physico-mathématique 117
Automatisation basée sur le modèle 119
Place et rôle de l'équipage 119

CONCLUSION 122

LIVRET 4 : FAUT-IL DES PILOTES À BORD ? 127

Jean PINET (Membre de l'AAE)

1ère partie : BASES et LIMITATIONS de la REFLEXION 128
L'évolution 128
Le comportement opérationnel 129
Deux super- agents 130
Ethique et responsabilité 130
Notre réflexion 131
Remarques importantes 131

2ème partie : L'HUMAIN OPERATIONNEL 131
L'automatisme intelligent humain 131
Fiabilité et apports humains 139

3ème partie : ETAT ACTUEL de la COOPERATION 143
Evolution des participations croisées et connectées Humain/automatismes 143

4ème partie : DIMINUTION de l'EQUIPAGE à BORD 160
Situation duale évolutive Humain-automatismes 160

Evolution possible, prévisible, des automatismes 162
Diminution du nombre de pilotes à bord 163
Un seul pilote à bord 166

5ème partie : PERSPECTIVES ESTIMEES 179
Evolution estimée 179
Arbitrage de l'évolution 181
Conclusion et Recommandations 182

RECOMMANDATIONS 182

ANNEXE : Vigilance sur les vols longs courriers (Jean-Claude Bück, Membre de l'AAE) 183

LIVRET 5 : APPROCHE ANALYTIQUE DES EVOLUTIONS DU PILOTAGE À L'HORIZON 2050 189

Jean BROQUET (Membre de l'AAE)

Introduction 190

Partie 1 : AXES d'AMELIORATION de la SECURITE des VOLS et de l'EFFICACITE ECONOMIQUE du PILOTAGE 190
Performances du pilotage au début des années 2000 193
Axes et objectifs d'amélioration de la sécurité du pilotage avec des équipages de 2 pilotes à bord, à l'horizon 2050 197
Evolution vers le pilotage avec un seul pilote à bord : Exigences relatives à l'assistance depuis le sol 203
Conclusions et Recommandations 221

Partie 2 : ILLUSTRATION de l'ASSISTANCE SOL dans le CAS d'UN SEUL PILOTE à BORD 223
Densité de surveillance par le pilote au sol, selon les phases de vol 223
Organisation du suivi par les Pilotes au sol 225
Nature, volume liens et débit des informations à transmettre via les de télécommunications 230
Synthèse et recommandations 232

Références 233

Annexe : Cas des Vols long-courriers avec un seul pilote à bord 234

LIVRET 6 : APPORT DE L'EXPERIENCE DES DRONES DANS LE CONTEXTE D'UNE AVIATION PLUS AUTOMATIQUE, INTERCONNECTEE 235

Alain JOSELZON (Membre de l'AAE)

Résumé 236

PREAMBULE 240

INTRODUCTION 241
Des drones militaires aux drones civils : bref retour sur l'histoire 241
Place et fonctions des drones dans l'aviation aujourd'hui 241
Drones civils dans le long terme 242

APPLICATIONS PRESENTES et FUTURES des DRONES dans la perspective de leurs apports potentiels 243
« Ecart » entre petits drones civils actuels et aéronefs de transport commercial 243
Interdépendances entre problématiques des drones actuels et celles du transport aérien 243
Impact direct du "phénomène drone" sur le volume et l'organisation du transport aérien de passagers 244
Apport potentiel spécifique des drones militaires au transport aérien de passagers 244
Utilisations potentielles de "l'espace aéronautique" pour les services à base de drones à l'horizon 2050 et contraintes de "cohabitation" pour le transport de passagers 245
Retombées technologiques et méthodologiques potentielles des développements et mises en œuvre de drones pouvant servir au transport aérien 249
Facteurs d'évolution vers des drones civils de grandes dimensions 251

RECOMMANDATIONS 255

CONCLUSIONS - VISION GLOBALE 258

Annexe 1 : Références documentaires 260

Annexe 2 : Les Défis majeurs à relever dans le développement des Drones 264

Annexe 3 : Expérience des drones 266

Annexe 4 : Problématique de Fiabilité-Sécurité des Drones 269

Annexe 5 : Extrait de la feuille de route européenne (juin 2013) 282

Annexe 6 : Réflexions complémentaires sur les Tendances, Finalités et Objectifs dans le développement des Drones 283

LIVRET 7 : L'ENVIRONNEMENT DE L'AVION CONNECTÉ 287

Coordinateur Gérard ROZENKNOP (Membre de l'AAE)

LES COMPAGNIES AERIENNES 289

Laurent BARTHÉLÉMY (Expert invité)
La question de l'exercice de l'autorité à bord 289
La création de la fonction « pilote au sol » 290
Le rôle du CCO et la communication opérationnelle 291
La communication commerciale 292

LA GESTION DE LA CIRCULATION AERIENNE (ATM) 293

Dominique COLIN de VERDIÈRE (Membre de l'AAE)
Introduction, contexte et limites de l'exercice 293
Les changements d'organisation dans l'ATM 294
Délégation des séparations à bord au pilote ou à des automatismes (ASAS full self-separation) 295
Les avions sans pilote à bord 295
Quelle automatisation embarquée pour l'ATM ? 296
Un système d'informations partagées et les réseaux 297
Conclusion 299
Recommandations 299
Annexe : Ébauche de scénarios de répartition des fonctions 300

LES BESOINS EN TELECOMMUNICATIONS 303

Luc DENEUFCHATEL (Expert invité)

Les besoins de communication à l'horizon 2050 associés à une plus grande automatisation de l'aviation.. 303
Les exigences techniques caractérisant les besoins opérationnels..... 304
Evaluation des besoins associés aux évolutions de l'ATM 306
Faut-il couvrir ces besoins de manière unique en termes de technologie ?..... 307
La criticité des liaisons de communication entre systèmes sol et systèmes embarqués dans une optique de plus grande automatisation 309
Les contraintes techniques et opérationnelles des communications 311
Les contraintes réglementaires de l'Union Internationale des Télécommunications (UIT) en matière d'accès au spectre radioélectrique 312
Les contraintes liées à la sûreté des opérations 314
Les pistes raisonnables..... 316
Conclusions et recommandations..... 317
Annexe : Evaluation préliminaire des échanges de données air/sol associés au concept avion connecté.... 318

LA METEOROLOGIE AERONAUTIQUE 320

Patrick DUJARDIN (Expert invité)

Les progrès de la science météorologique..... 321
Les programmes spécifiques pour la météorologie aéronautique 322
Intégration de l'information météorologique dans les systèmes de la navigation aérienne..... 322
Un exemple, le risque lié à la convection..... 323
Objectif de déploiement dans le cadre du Ciel Unique Européen 324
Un effort de recherche à poursuivre..... 324
Et des questions en suspens..... 325
Annexe : Acronymes et Références..... 325

LES BESOINS EN FORMATION POUR LES OPERATIONS FUTURES 327

Philippe CREBASSA (Expert invité*)*

Contexte..... 327
Quelles compétences pour le pilote ?..... 328
Une perspective élargie..... 329
L'avenir de la formation 330

ASPECTS JURIDIQUES.....331

Gérard ROZENKNOP (Membre de l'AAE)

Responsabilité du transporteur aérien 332
Responsabilité éventuelle d'autres parties prenantes..... 334

LIVRET 8 : DOMAINES CLES D'ETUDES ET DE RECHERCHES 337

Jean BROQUET (Membre de l'AAE)

Introduction.....338

1ère Partie : DOMAINES d'ETUDES et DEVELOPPEMENTS PRIORITAIRES 339

Automatisation du pilotage et maintien de l'attention des pilotes..... 340
Transition entre pilote automatique et reprise en main manuelle en cas d'imprévu 342
Utilisation de nouvelles techniques pour l'aide à l'interprétation des alarmes..... 342

Protections enveloppes du vol et détection de comportements ou d'actions dangereuses du pilote 343
Utilisation des probabilités associées aux événements météorologiques..... 344
Nouvelles répartitions des rôles bord et sol et maîtrise fonctionnelle de la complexité croissante du système de transport aérien 345
Maîtrise des développements industriels de systèmes complexes 346
Extension des nouvelles répartitions des rôles bord et sol : le cas du pilotage avec un seul pilote à bord... 347
Pilotage de plus en plus autonome 348

2ème Partie : DOMAINES de RECHERCHES en SUPPORT aux ETUDES et DEVELOPPEMENTS PRIORITAIRES 350
Compréhension des comportements humains et conséquences sur la place des pilotes à bord 351
Approche générale du partage des rôles entre l'Homme et la Machine 352
Interface Homme-machine 353
Ingénierie des interactions « Hommes-machines » 354
Ingénierie d'ensemble des systèmes de transport aérien 355
Maitrise du développement des systèmes embarqués et Résilience des systèmes..... 356

SYNTHESE et PERSPECTIVES 358

Références.....359

LIVRET 9 : SYNTHÈSE DES CONDITIONS À REMPLIR POUR LA RÉUSSITE DES ÉTAPES VERS PLUS D'AUTOMATISME 361

Dominique CHATRENET (Expert invité)

Hugues SUBRA de SALAFA (Expert invité)

Introduction.....362

RECOMMANDATIONS APPLICABLES AUX AVIONS ET OPERATIONS AVEC EQUIPAGE COMPOSE DE DEUX PILOTES 364
Court / moyen-courriers et long-courriers sans équipage renforcé 364
Très long courriers..... 367

RECOMMANDATIONS APPLICABLES AUX AVIONS ET OPERATIONS AVEC EQUIPAGE COMPOSE D'UN SEUL PILOTE A BORD, AVEC SUPPORT D'UN PILOTE AU SOL.....368
Court / moyen-courriers et long-courriers..... 369
Très long courriers..... 371

RECOMMANDATIONS APPLICABLES AUX AVIONS ET OPERATIONS AVEC EQUIPAGE COMPOSE D'UN SEUL PILOTE A BORD, SANS SUPPORT D'UN PILOTE AU SOL.....371

CONCLUSION 372

Introduction

Depuis près de 10 ans l'Académie de l'air et de l'espace (AAE) a lancé des études pour identifier à l'horizon 2050 les risques majeurs auxquels le transport aérien se trouve confronté, le maintien de la sécurité des vols restant un objectif primordial.

L'analyse a été confiée à sa Commission Aéronautique Civile (CAC) comprenant des membres de l'Académie (AAE) et des experts invités par l'AAE.

Dans un premier temps, l'AAE s'est attachée à définir les grands enjeux sociétaux auxquels le transport aérien est susceptible d'être confronté dans un futur proche. Le dossier n°38 de l'Académie, publié en 2013, répond à la question « Comment volerons-nous en 2050 ? » : il donne une vision et propose des recommandations de natures institutionnelle et industrielle.

L'analyse a ensuite été prolongée d'une réflexion prenant en compte l'histoire passée et les tendances futures sur des sujets plus spécifiques jugés susceptibles d'améliorer encore l'efficacité de ce secteur au même horizon. Parmi ces sujets, l'automatisation et la connectivité sont apparues de première importance et ont été retenues :

- l'automatisation, partant du constat qu'elle a déjà joué un rôle significatif dans l'amélioration de la performance et de la sécurité, donc que son extension pourrait encore y contribuer à condition de tenir compte des possibilités spécifiques et des limites de capacité d'intervention de l'humain ;
- la connectivité, du fait de son rôle essentiel de liaison, devant être capable de répondre aux besoins de fiabilité, de performance et de sûreté de transmission de données.

Le présent volume publie les éléments qui ont permis l'élaboration du dossier N°42 « Aviation plus automatique, interconnectée, à l'horizon 2050 » publié par l'AAE

La réflexion a consisté, à partir d'objectifs de haut niveau visant à améliorer la sécurité des vols, à recenser les conditions essentielles de succès d'une approche globale, cohérente et optimisée de l'emploi des automatismes, avec la connectivité nécessaire, dans le transport aérien. Cette approche considère des évolutions technologiques jugées possibles et probables, ainsi que des progrès dans la connaissance de l'humain, en particulier dans le domaine cognitif. La démarche a été focalisée sur la conduite du vol, centrée sur l'avion, en prenant en compte le facteur essentiel qu'est la relation homme-machine. Elle vise les principes de conception, d'exploitation et d'organisation des composantes opérationnelles majeures du système de transport aérien.

La mise en application de ces principes a imposé une analyse des risques encourus avec de nouvelles répartitions des tâches, des prises de décision et des responsabilités possibles.

En outre, de nombreux automatismes avancés ont été introduits dans des drones, aussi l'expérience acquise dans ce type de véhicules a été prise en compte dans ces études, dans la mesure où elle pourra être transférable aux avions de transport.

Enfin, notant que des initiatives de recherches nombreuses et variées existent, on a essayé d'évaluer leur complétude et d'encourager l'existence d'une coordination étroite entre acteurs de la recherche et de l'industrie, afin d'apporter les réponses nécessaires au développement innovant, efficace et sûr de ces automatismes. De façon délibérée, en raison des difficultés d'accès à l'ensemble des paramètres économiques entrant dans les calculs des coûts et bénéfices des réalisations et des opérations, les

répercussions économiques des solutions étudiées n'ont pas été analysées dans ce dossier, bien qu'elles soient des critères de choix essentiels. En revanche, en permettant de s'affranchir des contraintes purement économiques, cette décision a rendu possible le recensement de solutions paraissant techniquement faisables. Ainsi cette analyse propose de rester au niveau de recommandations techniques, disons certifiables, sous certaines conditions, laissant le soin aux acteurs économiques concernés de lancer de manière coordonnée les études correspondantes. Les résultats de ces études permettent aussi d'offrir des arguments concrets en réponse à des propositions théoriques ou économiques concernant la disparition envisagée de pilotes dans le cockpit basées sur d'uniques arguments financiers.

L'écriture du détail des réflexions a été confiée à des membres et experts de la CAC ayant participé à l'ensemble de l'étude, chacune traitant l'un des 9 thèmes principaux des réflexions. Le lecteur trouvera ici le détail de leurs réflexions présentées par thème.

A noter que les textes présentés dans le présent recueil restent de la responsabilité des auteurs conformément à la liberté d'expression cultivée par la commission.

Nous pensons que ces études donnent des éléments significatifs sur le besoin de pilotes à bord des avions à l'horizon considéré de 2050. Elles seront prolongées par des réflexions complémentaires sur les conditions de poursuite du succès du transport aérien.

Alain Garcia

Président de la CAC

Ancien vice-président de l'AAE

Jean Pinet

Ancien président de l'AAE

Liste des livrets

Livret 1: **sécurité actuelle et objectifs d'améliorations** - *Jean Broquet (AAE) et Xavier Champion (Expert invité : EI)*

Livret 2: **considérations générales sur les automatismes et leur histoire** - *Pierre Calvet (EI)*

Livret 3: **théorie élémentaire du vol automatique** - *Jean-Claude Ripoll (AAE)*

Livret 4: **faut-il des pilotes à bord ?** - *Jean Pinet (AAE)*

Livret 5: **approche analytique des évolutions du pilotage à l'horizon 2050** - *Jean Broquet (AAE)*

Livret 6: **apport de l'expérience des drones** - *Alain Joselzon (AAE)*

Livret 7: **l'environnement de l'avion connecté** - *Laurent Barthélémy (EI), Dominique Colin de Verdière (AAE), Philippe Crebassa (EI), Luc Deneufchatel (EI), Patrick Dujardin (EI) ; coordinateur Gérard Rozenknop (AAE)*

Livret 8: **domaines-clés d'études et de recherche** - *Jean Broquet (AAE)*

Livret 9: **synthèse des conditions à remplir pour réussir les étapes** - *Dominique Chatrenet (EI) et Hugues Subra de Salafa (EI)*

Livret 1 : SECURITE ACTUELLE DES VOLS ET OBJECTIFS D'AMELIORATIONS

Jean BROQUET (Membre de l'AAE)

Xavier CHAMPION (Expert invité)

C'est une évidence de dire que la sécurité, définie comme l'aptitude à éviter l'atteinte à l'intégrité physique de personnes est, comme pour tout moyen de transport public, une condition vitale pour le transport aérien commercial, ce qui explique l'attention particulière que l'ensemble de ses acteurs lui porte. Rappelons que le niveau de sécurité est apprécié par le taux d'accidents mortels par heure de vol ou plus généralement par vol.

La sécurité aérienne procède d'une approche globale :

- cohérente au niveau des composants du système de transport aérien que sont les aéronefs, le contrôle de la circulation aérienne et les aérodromes,

- coordonnée au niveau des acteurs que sont les compagnies aériennes, les constructeurs, les services de la navigation aérienne, les organismes de maintenance et, bien sûr, les organismes de vérification de la navigabilité,

- appliquée à l'ensemble des phases des processus depuis la conception jusqu'au fonctionnement du système de transport aérien.

Du point de vue de la sécurité, le transport aérien peut être comparé à une chaîne qui trouve sa robustesse dans la solidité de chacun de ses maillons et dans la qualité des liaisons entre eux.

Depuis toujours, l'aviation a été très encadrée par l'action des autorités, d'abord nationales puis internationales compte tenu de la nature de la portée de ce mode de transport. De son côté, l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) a progressivement développé des normes et recommandations pour chacune des composantes de l'activité aérienne : aéronefs, pilotes, compagnies aériennes, aérodromes, contrôle aérien. Ainsi a été constitué un ensemble cohérent de références qui sert de fondement pour chacun des acteurs du transport aérien à la définition de son approche de la sécurité. On y trouvera les principes de base et concepts, les méthodes de travail, les moyens de démonstration, les procédures de fonctionnement, sans oublier le traitement des liaisons entre acteurs. Avec la maturité de ce moyen de transport, l'accent a été dernièrement mis sur l'application des méthodes d'analyse de risque et le développement d'une approche nouvelle de la qualité.

Globale, la préoccupation de sécurité est aussi permanente. Il s'agit, en effet

- d'une part, d'évaluer l'impact de toute modification du système de transport par une analyse de risques et de couvrir ces risques par des dispositions adaptées, que la modification soit limitée ou profonde, et,

- d'autre part, de recueillir le maximum d'informations sur l'apparition ou le déroulement d'évènements pertinents rencontrés en exploitation, en premier lieu, les accidents ou incidents graves (avec pertes de vies humaines ou dommages matériels conséquents), mais aussi les incidents mineurs, surtout s'ils sont précurseurs afin de comparer la réalité avec les hypothèses retenues ou les conditions fixées pour la démonstration initiale de sécurité. Cette démonstration repose aujourd'hui sur des éléments variés basés sur, par exemple, les redondances, le comportement des acteurs, les analyses de fiabilité, et les émergences de faits nouveaux (on ne peut pas passer sous silence la question de la sûreté). Il sera toutefois noté que l'exploitation des incidents mineurs pose problème du fait de leur diversité et de la réticence que mettaient les acteurs à les rapporter. Pour ce point, des mesures de protection de la confidentialité ont été prises ouvrant la voie aux rapports mais il reste à définir des outils d'exploitation suffisamment performants pour en tirer tout l'enseignement qu'ils contiennent.

Réciproquement, toute amélioration future de la sécurité ne peut être obtenue que par des changements par rapport à la situation actuelle.

Compte tenu de la place que tient l'avion dans le transport aérien, du rôle que joue le pilote et de la nature du lien entre le pilote et l'avion et sur la base des progrès remarquables réalisés dans les dernières décennies avec son développement, l'emploi des automatismes et de l'interconnexion dans le transport aérien est un axe incontournable de réflexion pour l'amélioration de la sécurité aérienne.

Dans le contexte de l'étude de l'apport des automatismes sur la sécurité du transport aérien, le présent livret a pour objectif d'identifier, à partir des constats du niveau de sécurité atteint actuellement et des causes primaires d'accidents, des sources de progrès avec identification d'orientations principales possibles d'amélioration.

Note : on trouvera en fin de ce livret les références des documents utilisés sachant que les données analysées sont principalement tirées des documents sur les Statistiques d'accidents établis par Airbus : Commercial Aviation Accidents 1958-2014, a Statistical Analysis (Ref 2) ; Boeing : Statistical summary of commercial jet airplanes accidents, Worldwide operations 1959/2013 (Ref 3) ; et UK Civil Aviation Authority : CAP 1036, 776 & 681 Global fatal Accident 2002 to 2011, 1997 to 2006 & 1980 to 1996 (Ref 4, 5 & 6).

EVOLUTION du TAUX d'ACCIDENTS MORTELS

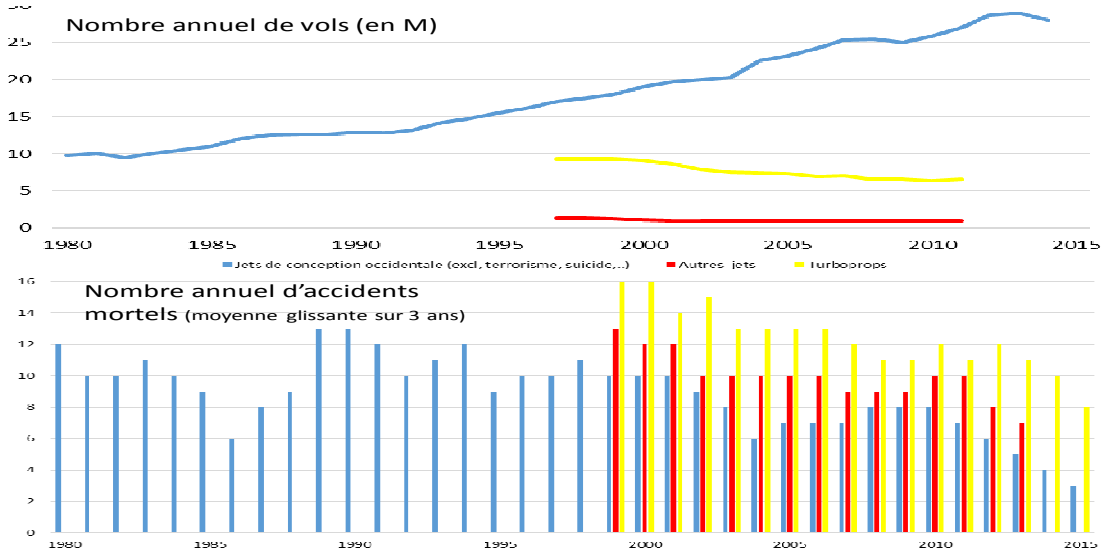
Des statistiques sur les nombres annuels de vols et le nombre d'accidents mortels sont données dans le document Airbus (Réf 2) pour les jets de conception occidentale depuis l'année 1980 jusqu'à 2014. Ces statistiques excluent les accidents résultant d'actes de terrorisme, de sabotage, d'actions militaires, de suicide ou équivalent.

Des informations complémentaires relatives d'une part aux turbopropulseurs et d'autre part à l'ensemble des autres jets et autres types d'accidents peuvent être trouvées dans les rapports CAP (Réf 4, 5 et 6) pour les années 1996 à 2011.

D'autres informations sur les accidents complémentaires de jets ont été recueillies par ailleurs pour les années 2012 et 2013. Les données relatives spécifiquement aux vols assurés par les opérateurs d'Amérique du Nord avec des jets de conception occidentale ont été tirées du document Boeing (Réf 3).

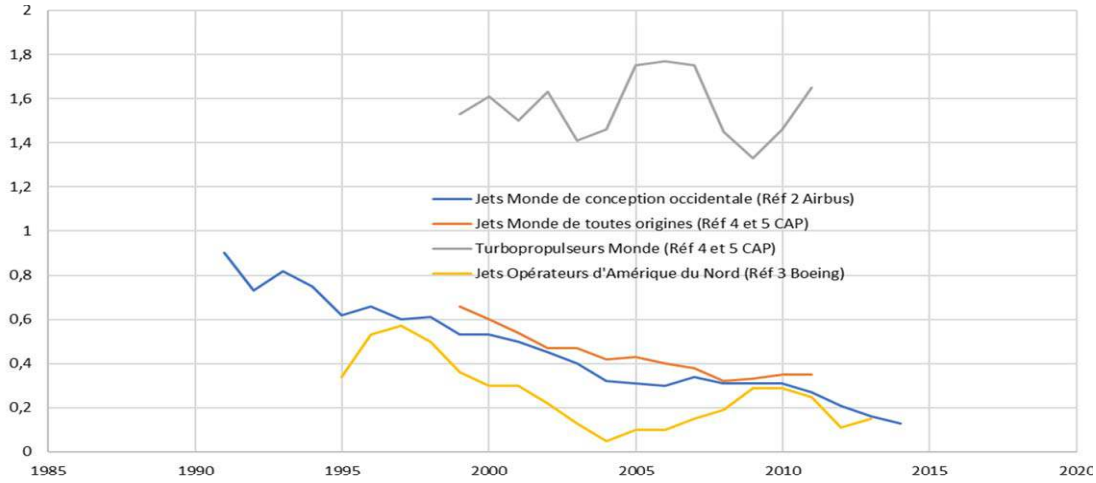
Ces statistiques apparaissent sur les figures suivantes avec des valeurs annuelles pour les nombres de vols et des moyennes annuelles sur une fenêtre glissante de 3 ans pour les nombres et taux d'accidents mortels.

Evolution du nombre annuel (en M) de vols et du nombre annuel d'accidents mortels (moyenne sur 3 ans se terminant à l'année indiquée**)**



Taux d'accidents mortels par million de vols pour le transport aéronautique commercial de 1992 à 2013 (moyenne sur 3 ans se terminant à l'année indiquée), respectivement pour :

- *transport mondial par jets de conception occidentale (Airbus Réf 2)*
- *transport mondial par jets de toutes origines (CAP Réf 4 & 5)*
- *transport mondial avec des turbopropulseurs (CAP Réf 4 & 5)*
- *transport par les opérateurs d'Amérique du Nord par jets de conception occidentale (Boeing Réf 3)*



Les données recueillies au niveau mondial (Airbus Réf 2 et Boeing Réf 3), limitées aux jets de conception occidentale, font apparaître un taux d'accidents mortels identique d'environ 0,30 par M de vols sur la période 2002 à 2011 avec un périmètre d'analyse assez similaire : 205 M vols sur les 10 ans pour les données Boeing et 235 M vols pour les données Airbus. (Ce taux moyen est recalculé en divisant le nombre total d'accidents mortels sur 2002-2011 par le nombre total de vols sur la même période).

On constate que le taux d'accidents mortels pour les vols assurés par les opérateurs d'Amérique du Nord (et en fait de façon similaire pour les opérateurs de l'Union Européenne) a baissé jusqu'au début des années 2000, mais n'a pas montré une tendance évidente à la baisse au cours des années 2002-2011, au cours desquelles il a été d'environ $0{,}16 \times 10^{-6}$ / vol. Une tendance à la baisse semble apparaître à nouveau depuis 2012.

Les données recueillies au niveau mondial dans la Réf 4 (CAP) pour les jets (non limités à ceux de conception occidentale) font apparaître un nombre total de 248 M de vols de durée moyenne ~ 2 heures, sur la période 2002 à 2011 et un taux d'accidents mortels de 0,37 par M de vols. Les valeurs pour les turbopropulseurs sont de 70 M de vols de durée moyenne ~ 0,9 heure avec un taux d'accidents mortels de 1,6 par M de vols.

Le taux moyen d'accidents mortels au niveau mondial sur la décennie 2002 à 2011 (CAP Réf 4) pour le transport commercial avec des jets et des turbopropulseurs (avions de plus de 5,7 tonnes, non limités à ceux de conception occidentale) est donc pénalisé par celui des turbopropulseurs. Il est d'environ 0,64 par M de vols.

OBJECTIFS GLOBAUX de REDUCTION du TAUX d'ACCIDENTS MORTELS d'ici à 2050

Le Rapport de l'Académie de l'Air et de l'Espace du 15 avril 2013 (Réf 1) formule la recommandation suivante pour la sécurité des vols : « *Il est impératif de fixer un objectif d'amélioration de la sécurité d'un facteur 4 d'ici à 2050, par rapport au niveau de 2009 sur un plan mondial, aucun continent ne devant avoir un niveau de sécurité deux fois plus faible que le niveau moyen mondial* ».

L'objectif d'amélioration de la sécurité du transport aérien (jets et turbopropulseurs) dans un rapport 4 d'ici à 2050 par rapport au niveau de 2009, telle que vue par chacun des passagers correspond à une réduction dans un rapport 4 du taux d'accidents mortels par vol, pour atteindre un taux typiquement

inférieur à 0,16 x 10^{-6} /vol. On peut noter que cette valeur correspond approximativement au taux actuel observé pour les jets en Amérique du Nord et en Europe dans les pays membres de l'UE.

Le rapport de l'Académie de l'Air et de l'Espace (Réf 1) définit un modèle d'évolution possible du trafic mondial d'ici à 2050, comme suit :

- *Facteur d'augmentation en PKT (Passagers Kilomètres Transport) entre 2010 et 2050 :*
  - *. Europe* *1,4*
  - *. Amérique du Nord* *2,1*
  - *. Asie-Pacifique* *5,5*
  - *. Reste du Monde* *4,4*
  - *. Moyenne pour l'ensemble du Monde* *~3*

- Augmentation par ~ 2 du nombre de vols et par ~ 1,5 des PKT par vol (due à l'augmentation moyenne de capacité, du taux de remplissage et du rayon d'action moyen), pour répondre à l'augmentation par 3 du trafic total en PKT

Si l'on appliquait les taux actuels d'accidents mortels par région d'aujourd'hui au modèle de trafic établi dans le rapport de l'Académie de l'Air et de l'Espace pour 2050, alors le taux moyen d'accidents mortels au niveau mondial en 2050 s'établirait à la valeur purement théorique de ~0,8 x 10^{-6} accident mortel par vol (voir Tableau ci-dessous) et le nombre absolu d'accidents mortels serait en augmentation d'un facteur environ 2,5 par rapport à la moyenne sur la période 2002 2011.

Bien évidemment l'augmentation de trafic d'ici 2050 se fera avec de nouveaux moyens bord et sol, notamment des avions de génération 4 et au-delà, et donc le taux d'accidents diminuera naturellement beaucoup, particulièrement dans les régions avec les taux les plus forts aujourd'hui.

Ce taux théorique d'accidents mortels de ~0,8 x 10^{-6} par vol montre néanmoins que l'exigence d'amélioration de sécurité des vols jusqu'à un taux typiquement inférieur à 0,16x 10^{-6} /vol correspond globalement à une réduction moyenne du taux d'accidents mortels dans un rapport 5.

Taux théorique d'accidents mortels avec l'évolution du trafic d'ici à 2050 et avec les taux d'accidents mortels par région observés aujourd'hui (jets & turbopropulseurs de plus de 5,7 t).

Moyenne annuelle (en Million) Régions	Facteur multiplicatif du Nbre de vols d'ici 2050 (~)	Période 2002/2011		Extrapolation à 2050	
		Nbre de vols	Nbre d'accidents mortels	Nbre de vols	Nbre théorique d'accidents mortels *si l'on applique les taux 2002/2011 par région*
Europe	*0,93*	8,6	4,8	8	4,5
Amérique du Nord	*1,4*	12	1,8	16,8	2,5
Asie-Pacifique	*3,7*	6,5	3,8	24,1	14
Reste du Monde	*2,9*	4,7	10,2	13,6	30
Total		31,8	20,6	62,5	51,0
Moyenne mondiale des Taux d'accident annuels par M de vols : *Entre* ***2002/2011 :*** **0,64** ***et vers 2050 :*** **0,8** *(valeur théorique avec les taux d'accidents d'aujourd'hui par région)*					

Notes :

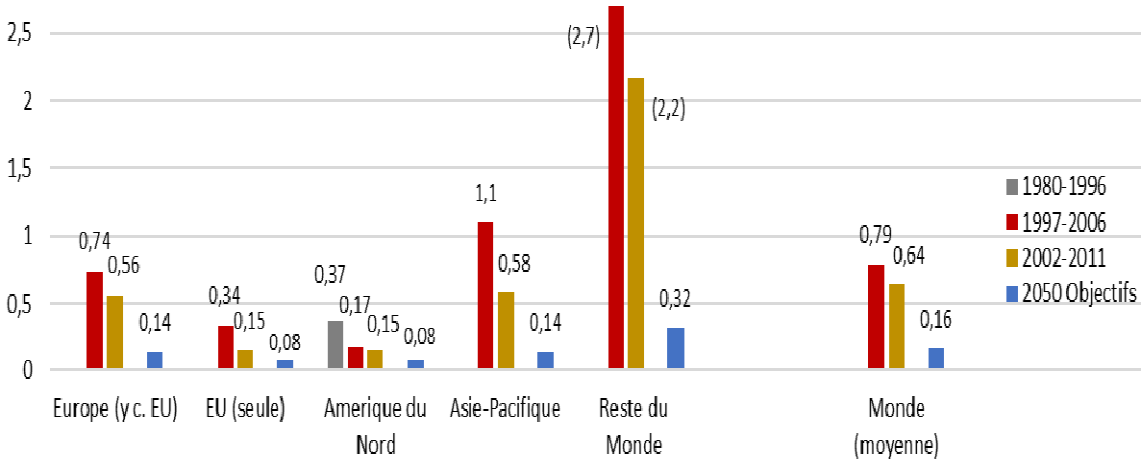
1 On a utilisé ici principalement des données CAP (Réf 4) avec le support de la Réf 7 (IATA) pour l'adaptation des données aux régions considérées dans ce livret

2 Compte tenu du caractère exploratoire de l'analyse faite ici sur la base des données statistiques disponibles, le volume moyen de trafic et le taux moyen d'accidents mortels sur la période 2002/2011 sont considérés comme

suffisamment représentatifs des valeurs correspondantes pour 2009 (qui est la date de référence dans la recommandation de l'AAE)

La figure suivante montre, en synthèse, sur la base des Réf 4 (CAP) et Réf 7 (IATA), les taux d'accidents mortels par vol, pour les avions de transport de passagers et les cargos de plus de 5700 kg, de types « jets » et « turbopropulseurs » dans différentes régions du monde (zones de rattachement des opérateurs) dans les périodes 1997-2006 et 2002-2011. Elle propose, de plus, des objectifs typiques à atteindre en 2050 par zone géographique pour obtenir un taux moyen mondial inférieur à 0,16x 10^{-6} / vol (réduction par un facteur 4) tout en respectant la seconde condition, rappelée au début du chapitre, qu'aucun continent (ou région telle que définie ici) ne devrait avoir un niveau de sécurité deux fois plus faible que le niveau moyen mondial.

Taux d'accidents mortels (par M de vols) dans différentes régions du monde (zone de rattachement des opérateurs) constatés au cours des dernières décennies, et Objectifs (plafond) proposés pour 2050.



Note : Compte tenu de la très grande diversité des situations dans les pays englobés sous la dénomination "Reste du monde", les taux d'accidents correspondants ne sont pas représentatifs de ceux d'un pays en particulier.

Pour les opérateurs d'Amérique du Nord et des pays de l'Union Européenne, l'objectif d'amélioration de sécurité est donc d'un rapport ~ 2, ramenant le taux d'accidents mortels par vol de 0,15 x 10^{-6} à 0,09 x 10^{-6}. Cet objectif impose des efforts au-delà de la généralisation des équipements utilisés et des pratiques mises en œuvre sur les avions de dernière génération. (A titre indicatif, le taux moyen d'accidents mortels au cours de la décennie 2004 à 2014 pour les jets de conception occidentale de dernière génération est encore de 0,11x10^{-6} / vol).

Les améliorations en Europe (hors pays de l'UE), en Asie-Pacifique et dans le "Reste du Monde" viendront en partie du remplacement des avions d'anciennes générations. Elles viendront aussi d'une meilleure utilisation de l'expérience acquise aujourd'hui en Amérique du Nord et dans les pays de l'UE avec une adaptation des règles de sécurité tenant compte de la culture propre à chacun des pays. Les progrès à venir d'ici 2050 dans ces deux dernières régions faciliteront aussi les progrès dans les autres parties du Monde.

OBJECTIF SPECIFIQUE d'AMELIORATION de la SECURITE du PILOTAGE d'ici à 2050

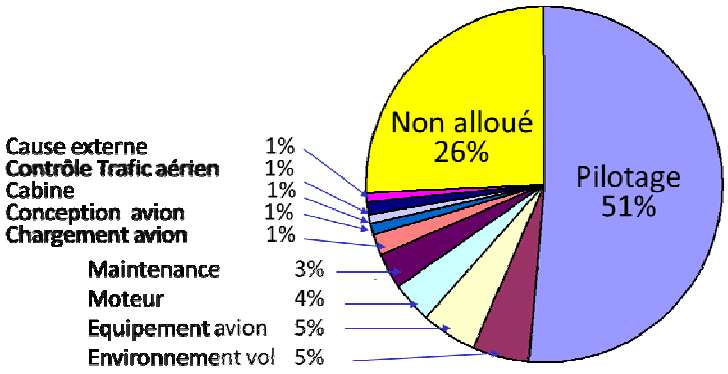
L'amélioration de la sécurité des vols devra être obtenue par des évolutions de toutes natures dans les équipements bord et sol, les systèmes, les services, les opérations, les procédures, ...qui peuvent avoir un impact sur le taux d'accidents.

On tente de définir dans ce chapitre l'objectif spécifique d'amélioration de la « sécurité du pilotage » en considérant la part prise dans l'ensemble des causes d'accidents.

Le rapport CAP 1036 Global fatal accident (Réf 4) identifie pour chacun des accidents : une cause primaire, les autres causes principales et les facteurs circonstanciels aggravants. La figure suivante tirée de ce rapport CAP montre, pour l'ensemble des jets et des turbopropulseurs de transport commercial (ainsi que des business jets), la prépondérante des déficiences des équipes de pilotage dans les causes primaires d'accidents au niveau mondial.

Les causes hors pilotage sont identifiées sommairement sur la figure sous des vocables dont on pourra trouver la signification plus précise dans le document CAP 1036 (Réf 4).

Répartition des causes primaires d'accidents mortels au niveau mondial sur la période 2002-2011



La défaillance de l'équipage est reconnue comme cause primaire d'accidents mortels dans plus de 50% des cas. Elle est reconnue comme l'une des causes principales (y compris les causes primaires) dans 66% de cas.

Ces pourcentages étaient respectivement de 76% et 88% dans la période 1980-1996 et de 66% et 75% dans la période 1997-2006 ce qui confirme la continuité de la prépondérance des défaillances de l'équipage dans les taux moyens d'accidents ainsi que la tendance régulière à l'amélioration absolue et relative au cours des 3 dernières décennies.

L'analyse des causes d'accidents relatives aux seuls opérateurs de la région « Amérique du Nord » fait apparaître la même prédominance (plus de 50% des causes primaires et plus de 66% de l'ensemble des causes principales) des défaillances de l'équipage.

Les améliorations de sécurité peuvent difficilement être assignées aux causes non clairement identifiées (en jaune sur la figure).

L'objectif d'amélioration globale de sécurité des vols dans un rapport 2 pour les opérateurs d'Amérique du Nord ou des pays de l'UE devrait se traduire par un objectif d'amélioration dans un rapport typiquement de 3 pour les causes identifiées et donc en particulier pour les causes liées au « pilotage ».

Le CAS des JETS de FABRICATION OCCIDENTALE : AXES d'AMELIORATIONS POTENTIELLES de la SECURITE des VOLS

Les documents donnés en référence (données statistiques Boeing) donnent certaines indications ; une répartition des accidents par catégorie a été faite par Boeing /CAST. La même analyse est faite par Airbus (Commercial aviation accidents 1959- 2014) ; les accidents durant les opérations au sol sont

maintenant comptabilisés ; cela indique clairement que l'aspect Homme machine doit être considéré pour tous les domaines.

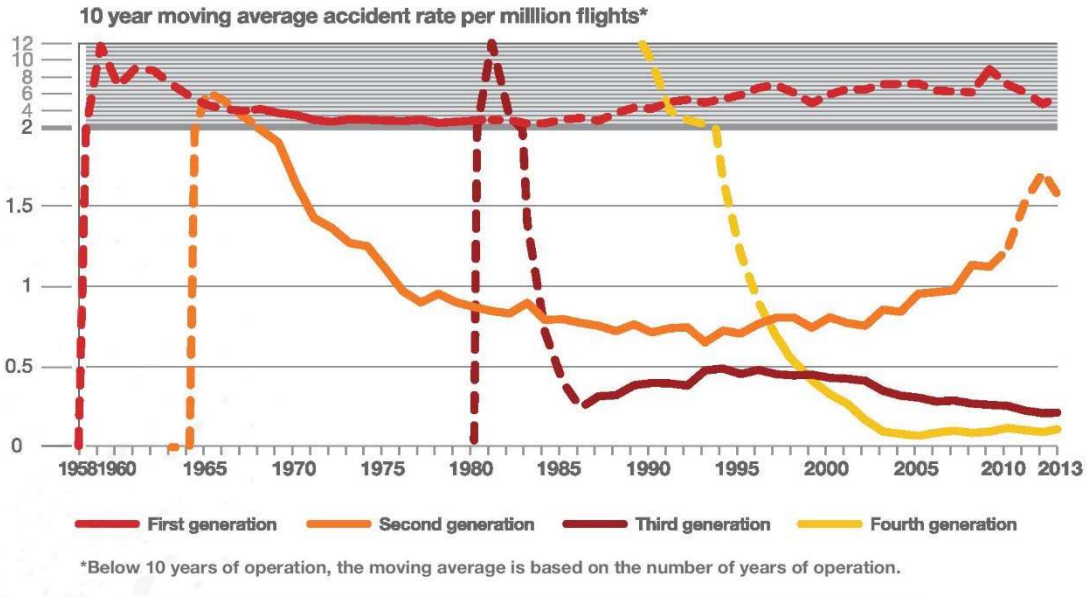
Pour chaque catégorie, il faut connaitre les causes et en particulier déterminer dans quelle mesure le facteur humain intervient ;

- Comme indiqué plus haut, les rapports de la UK CAA (global safety accident review, CAP 1036 pour la période 2002-2011 et CAP 776 pour la période 1997-2006) montrent que la cause primaire des accidents mortels reste l'erreur humaine dans plus de 50% des cas dans la période 2002-2012 et dans près de 67% des cas dans la période 1997-2006 ;

Nota : Les aspects ergonomiques ont été systématiquement pris en compte dans la conception à partir des années 1990 et le bénéfice apparait ; il faut néanmoins persévérer ;

- Pour chaque catégorie, l'analyse Airbus donne l'évolution des taux en fonction de la technologie de conception, les avions ayant été classés en 4 générations, la 4ème étant la plus récente (classement commun Airbus et Boeing) ;

Taux d'accidents mortels par génération d'avions

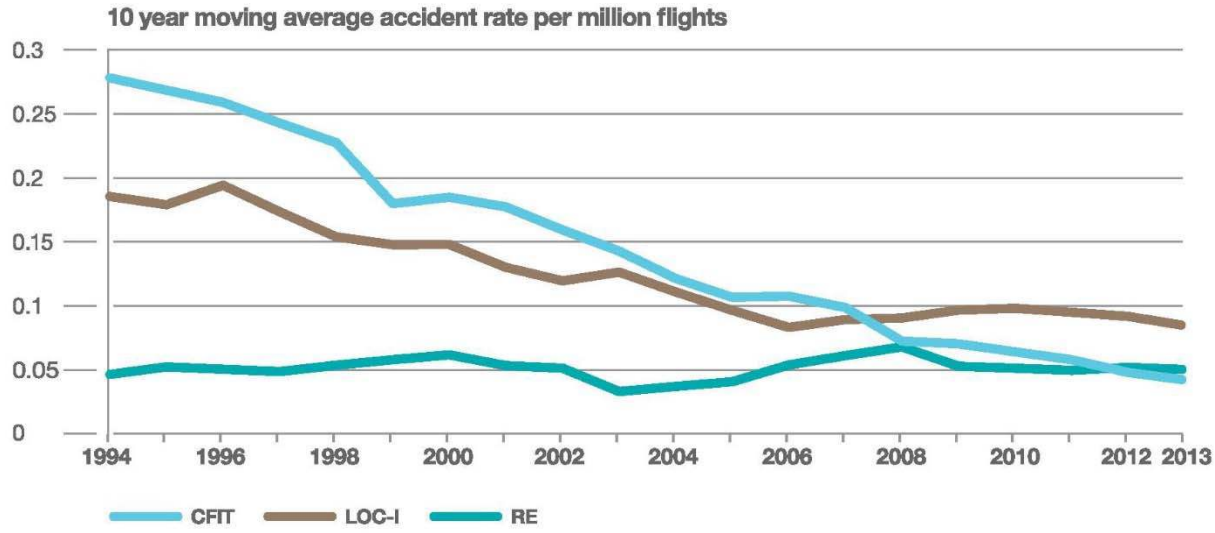


	Nb d'accidents mortels		Nb de Morts	
	1994-2003	**2004-2013**	**1994-2003**	**2004-2013**
Total	105	72	6795	3906
(LOC) Perte de contrôle	33	16	2234	1576
(CFIT) Collision avec le sol, vol contrôlable	24	16	1822	804
(RE) Sortie de piste à l'atterrissage	16	17	192	796
Décollage	3	4	65	38
Opérations au sol	Non comptabilisé	7	Non comptabilisé	8
Collision en vol	2	2	420	156
Explosion de réservoir carburant	2	0	231	0
Incursion sur la piste	3	0	121	0
Causes non identifiées	6	3	502	202*

**les 327 morts de l'accident du MH 370 ne sont pas comptés*

De ce découpage par catégories, on peut en déduire que :

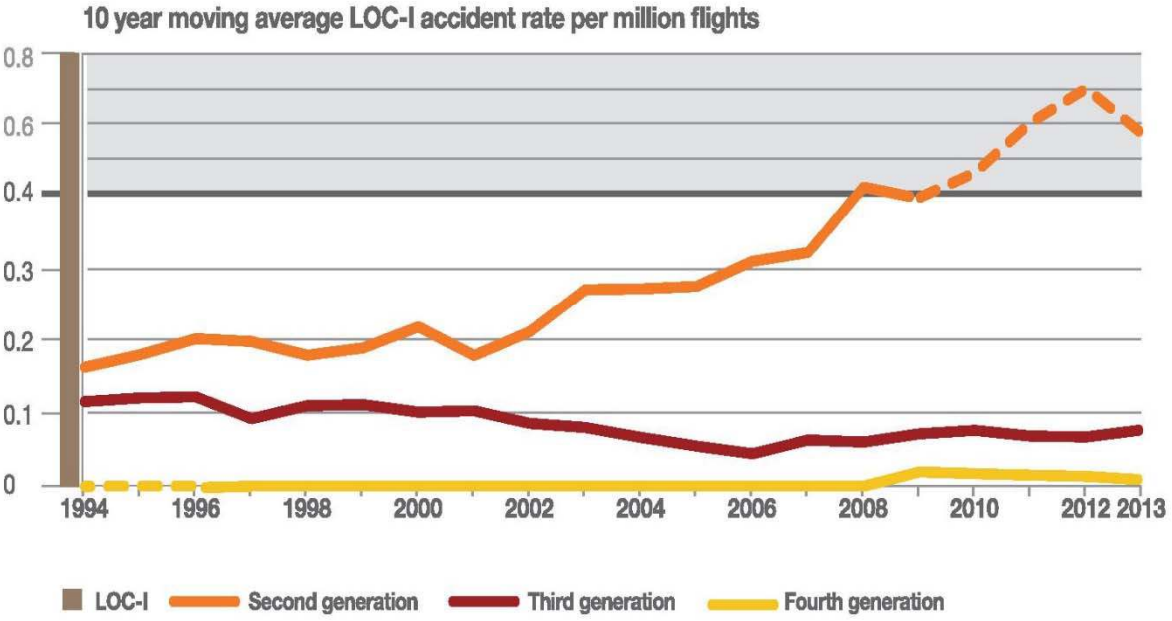
- Les 3 premières catégories subsistent même s'il y a des progrès significatifs comme le montre la planche ci-après :



- En 4e catégorie le nombre d'accidents inexpliqués reste trop élevé ;

Pour ces 4 catégories, une analyse plus détaillée a été faite et des recommandations ont été formulées.

Perte de contrôle (LOC)



L'erreur humaine est la cause primaire pour cette catégorie ; la CAA (Civil Aviation Authority) a différencié 5 classes d'erreurs :

- l'aptitude au pilotage : maniabilité (*adresse ?)*
- le manque d'action et de prise de décision

- défaut de repérage spatial (“lack of positional awareness in air”)

- mauvais jugement, défaut de professionnalisme ou manque de discipline aéronautique (“poor professional judgment or airmanship”)

- non-suivi délibéré des procédures (“ deliberate non adherence to procedures”)

Le pourcentage pour chaque domaine n’a pas changé mais le nombre absolu a diminué pour les avions de la 3e et 4e génération.

Il faut continuer à travailler dans chacun de ces domaines ; les avions de dernière génération ne sont pas exempts de ce risque en particulier pour les accidents survenant en croisière.

***Recommandation 1* :**

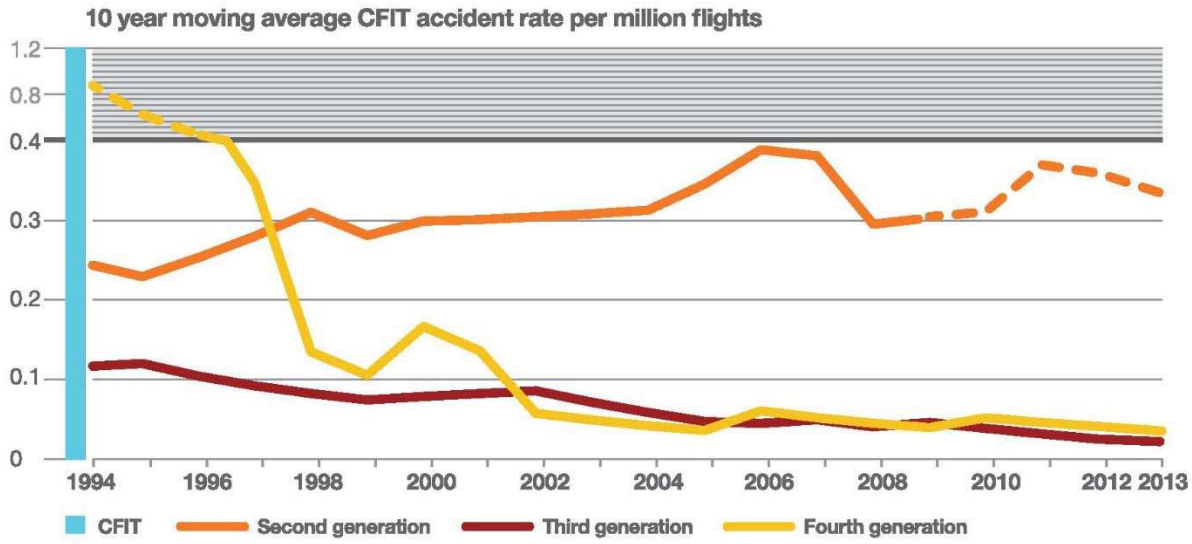
Trois axes à investiguer :

- Aide à la décision : présenter la situation de l’avion dans le domaine de vol lorsqu’il s’approche des limites ; en particulier, les limites aérodynamiques, incidence, dérapage, survitesse ;

- défaut de repérage spatial : passage automatique en mode sauvegarde ;

- Aptitude au pilotage, maniabilité; réduire la nécessité pour l’équipage de reprendre en mains en cas de pannes systèmes lorsque la probabilité est faible, situation qu’un équipage ne rencontrera pratiquement jamais, mais qui arrive dans une flotte. Laisser le pilote automatique actif, avec des performances éventuellement dégradées, en cas de panne système pour donner à l’équipage le temps nécessaire à l’analyse et à la décision.

Collision avec le sol (CFIT)



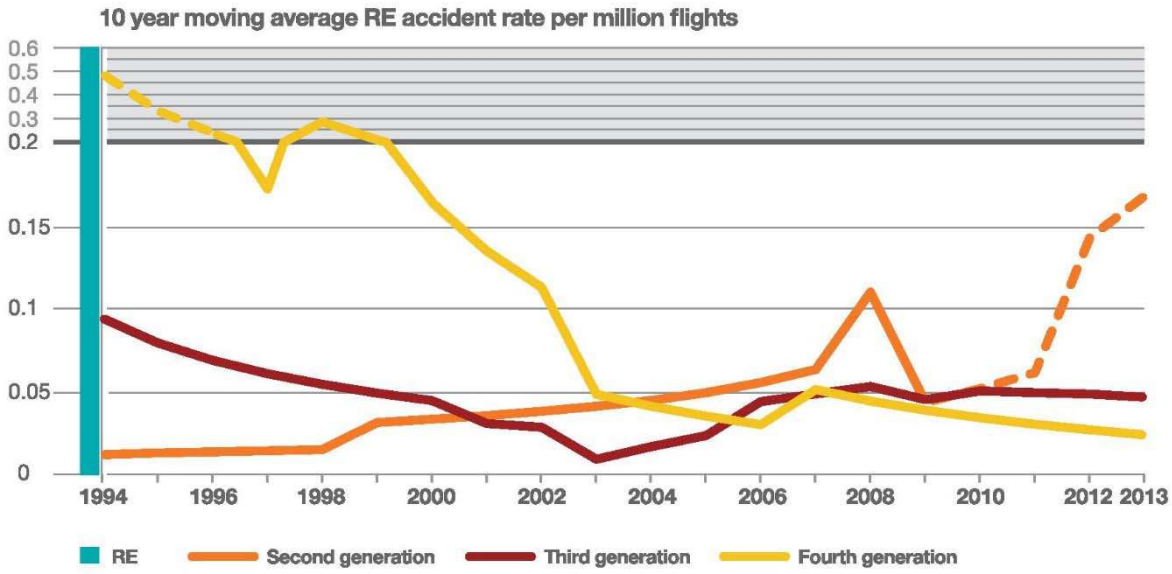
La planche ci-dessus montre clairement que ce sont les avions de deuxième (et donc de première) génération qui sont sujets à ce risque ; cette catégorie devrait « disparaitre » par l’attrition des flottes anciennes. On constate une réduction d’un tiers du nombre d’accidents mortels entre les deux décennies considérées.

. L’autre cause est le non-respect des procédures même en cas d’alarme GPWS.

***Recommandation 2* :**

Considérer l’introduction d’une fonction remise de gaz automatique en cas d’alarme GPWS (ou EGPWS, la nouvelle génération d’alarme).

Sortie de piste à l'atterrissage (RE)



Le nombre de sorties de piste à grande vitesse a augmenté ; en particulier pour les atterrissages avec un inverseur de poussée en panne sur bimoteur ;

La non-sortie des hypo-sustentateurs est aussi une autre cause primaire ;

Recommandation 3 :

- Un axe d'amélioration est l'augmentation de la disponibilité des inverseurs de poussée et des hypo-sustentateurs avec moins d'une non-sortie par million de vols.

- Le deuxième axe consiste à présenter la situation énergétique à l'équipage en approche, en lui montrant le point d'impact prévu sur la piste et le point d'arrêt de l'avion ; ce développement en cours est déjà introduit depuis deux ans sur des avions de production, mais il est trop tôt pour en mesurer l'effet ;
(Cela peut se traduire par une légère augmentation du nombre de remise gaz tous moteurs en fonctionnement, manœuvre qui n'offre pas un « bon » niveau de sécurité pour les bimoteurs ; cet inconvénient peut être pallié par l'introduction d'une remise de gaz automatique, la charge de travail équipage dans une remise de gaz manuelle étant trop élevée pour assurer une surveillance de la trajectoire).

Accidents inexpliqués

Le nombre d'accidents inexpliqués reste trop significatif ; chaque accident doit être analysé et ses causes identifiées ; ceci impose de pouvoir récupérer les données et les échanges internes et externes qui ont eu lieu dans les dernières minutes avant le crash. Le cas du vol MH 370 est le meilleur exemple.

Recommandation 4 :

- Un système automatique de transmission de données avec une couverture mondiale doit être rapidement mis en place, le système de localisation rendu obligatoire par l'OACI est un premier pas et le calendrier doit être accéléré pour les avions à long rayon d'action ;

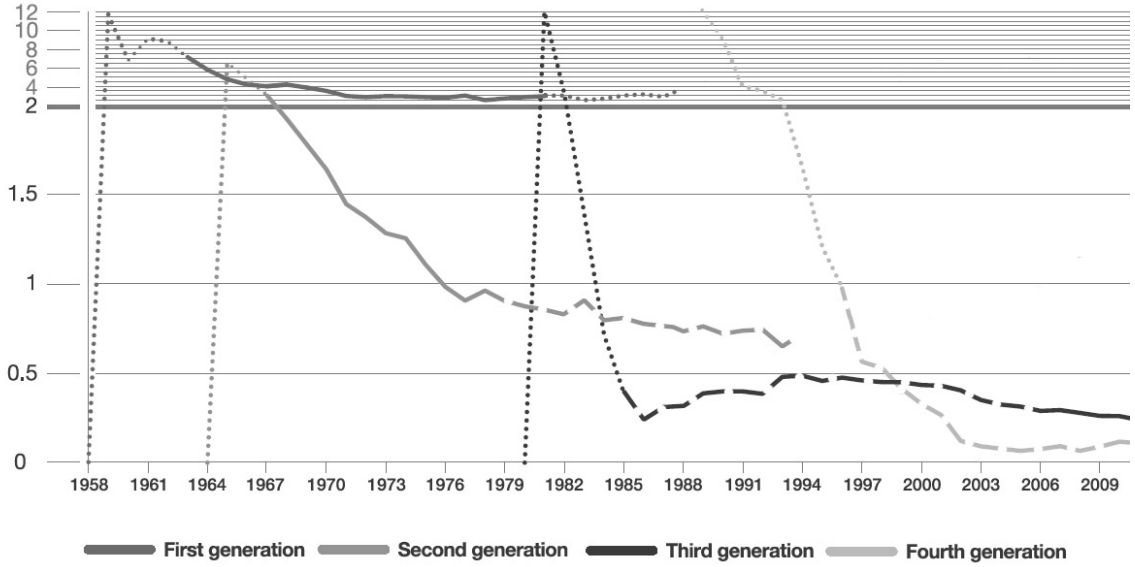
Introduction des avions de nouvelle génération

Les données Airbus (Réf 2) montrent les taux très élevés d'accidents lors de l'introduction de chacune des 4 générations de jets de conception occidentale (voir figure ci-dessous).

Bien que les nombres de vols correspondants soient limités, le nombre absolu d'accidents est significatif. Ainsi l'introduction des jets de quatrième génération a été responsable d'un nombre d'accidents mortels exceptionnel de l'ordre de 15 au total sur 6 ans au cours des années 1989 à 1996.

Mike Feary (Réf 8) souligne plus généralement, dans sa présentation au cours du colloque AAE des 1 et 2 juin 2016, qu'une attention particulière doit être portée aux taux d'accidents dans la phase transitoire lors de l'introduction de nouveaux automatismes.

Taux d'accidents par M de vols lors de l'introduction des 4 générations de jets de conception occidentale (données Airbus) *Moyenne sur l'ensemble des années d'opérations ou moyenne glissante sur les 10 dernières années après plus de 10 ans d'opérations*



Références

1 Académie de l'Air et de l'Espace Avril 2013 **"Comment volerons-nous en 2050** ?

2 Airbus 2014, Commercial **Aviation Accidents 1958-2014, A Statistical Analysis**

3 Boeing 2013, **Statistical summary of commercial jet airplane accidents**, Worldwide operations 1959/2013

4 *UK Civil Aviation Authority 2013* **CAP 1036 Global fatal Accident 2002 to 2011**

5 *UK Civil Aviation Authority 2008* **CAP 776 Global fatal Accident 1997 to 2006**

6 *UK Civil Aviation Authority 1998* **CAP 681 Global fatal Accident 1980 to 1996**

7 IATA **Safety Report 2014**

8 Mike Feary NASA **Evaluating Human- Autonomy teaming: How do we ensure Resilience?** Présentation au colloque AAE: "Will Air Transport be fully automated by 2050? 1 & 2 juin 2016

Livret 2 : CONSIDERATIONS GENERALES sur les AUTOMATISMES et leur HISTOIRE

Pierre CALVET (Expert invité)

Avant-propos

L'ensemble des présents livrets a pour objectif de développer le thème « **Aviation plus automatique, interconnectée, à l'horizon 2050 »**. Le livret 2 a été intitulé « **Considérations générales sur les automatismes et leur histoire** ».

- Si on limite le terme « Aviation » aux aéronefs et à leurs pilotes, « *Aviation plus automatique* » peut signifier « Plus d'Avionique » : l'avion est au centre des moyens et des activités du « Système de Transport aérien », et les automatismes, en développement croissant, jouent un rôle majeur dans l'Avionique moderne comprise comme l'ensemble des fonctions électroniques et informatiques de bord.

- « *interconnectée* » s'appliquera d'une part aux liaisons entre équipements internes d'un avion, et d'autre part à l'ensemble des communications plus ou moins interactives avec les éléments extérieurs : centres de contrôle et d'informations au sol (ATC, CCO, Météo …), autres appareils, satellites.

- « *L'horizon 2050* » est l'échéance qui marquera la vétusté des avions récents. C'est aussi la limite prospective du dossier 38 de l'AAE « Comment volerons-nous en 2050 ? ».

Concernant le livret 2, des « *Considérations générales* » doivent couvrir un large panorama offrant des points de vue étendus et variés ; « considérer » appelle à envisager plusieurs facettes d'une même réalité. Les enchaînements ramèneront souvent autour des mêmes objets : le sujet est vaste et touffu, sa diversité autorisera des répétitions et des excursions hors d'un itinéraire strict.

L'« *histoire* » des automatismes embarqués, depuis leur genèse, est riche en apports d'équipements innovants accumulés jusqu'à aujourd'hui. L'Aéronautique, qui a longtemps évolué au fil de progrès continus, voit maintenant venir des ruptures potentielles du fait de l'irruption récente du numérique dans nos modes de vie**.**

Pourquoi « plus » automatique ?

Pourquoi envisager une aviation *plus* automatique et interconnectée ?

Le livret 1 introduit un début de réponse à ces questions en présentant la situation du transport aérien sous ses multiples aspects, notamment sécuritaires, en relation avec :

- la large utilisation des techniques numériques et de leurs applications aux automatismes aéronautiques, en progrès constants depuis les dernières décennies,

- la part majoritaire des implications humaines dans les accidents,

- la stabilisation ou diminution, depuis une dizaine d'années, du nombre annuel de ces accidents malgré l'augmentation régulière du trafic.

On sent bien qu'une corrélation existe entre ces trois constatations, et justifie un maintien d'intérêt vers « plus » d'automatisation, ce que confirmera en appui du livret 1 une *analyse historique* se prêtant à une projection vers l'avenir.

Pourquoi « 2050 ?

Le livret 1 rappelle que, dans sa complexité et son étendue, le transport aérien doit se gérer en coordonnant ses multiples composantes internes et externes. Une vision globale est à cerner au moins jusque vers 2050, fin d'exploitation estimée pour les avions récents ou actuellement en cours d'étude en vue de réalisations à court terme. Les programmes doivent mettre en cohérence le vieillissement des matériels, en confrontation avec l'adaptation aux évolutions prévisibles des diverses composantes technico-économiques et sociétales du transport aérien.

C'est dans ce cadre qu'on peut espérer une amélioration de la sécurité, nécessaire dans un contexte de croissance où l'informatisation et l'interactivité des communications sont appelées à jouer un rôle décisif.

Limitations du sujet du livret 2

L'exposé sera focalisé sur les automatismes *de bord* mis à la disposition d'un équipage pour piloter, naviguer et communiquer. C'est un aspect très limité en comparaison de la totalité des services apportés par les organismes de gestion, de contrôle et d'assistance (Compagnies, Navigation aérienne, Météo), en rapport étroit avec la Règlementation internationale.

Mais notons que l'avion et son équipage constituent toujours dans le transport aérien les éléments les plus fragiles et les plus exposés, ceux dont la fiabilité et l'efficacité exigent le plus de soins, d'attentions, et d'efforts au niveau de la Recherche, de l'Industrialisation et de la formation des personnels, en vue de préserver et, si possible, d'améliorer la sécurité et la sûreté dans les voyages.

Considérons aussi que le transport aérien de passagers n'a pu se développer qu'une fois le vol IFR (Instrument Flight Rules) pratiqué dans des conditions admissibles de sécurité. Elles ont été acquises grâce à des instruments de bord, à des servocommandes et à des aides radioélectriques qui ont donné aux pilotes la possibilité de contrôler comportement et localisation dans des conditions environnementales difficiles. Ces moyens se sont amplifiés et améliorés par étapes successives grâce aux radars, aux centrales inertielles, aux réceptions satellitaires, et ils progressent sans cesse grâce aux techniques numériques.

Le livret 2 tentera de rendre compte de cette évolution historique.

Chapitre 1 : CONSIDERATIONS sur les AUTOMATISMES de BORD

Leur évolution jusqu'à l'ère du numérique

Quelques considérations préalables sur le transport aérien vont dégager des points saillants qui ont émergé progressivement au cours de l'histoire de l'Aéronautique. Elles amèneront à poser la question de la nécessité de pilotes à bord, dans un avenir plus ou moins lointain. En bref, vers quoi nous entraîne « le progrès » ? En particulier, l'automatisation permettra-t-elle de rendre *autonome* la conduite d'avions commerciaux ?

« *Automatiser et communiquer »* peut être un mot d'ordre pour améliorer le confort des passagers, pour faciliter les accès et l'accueil dans les aéroports, pour mille occasions d'innover, et surtout pour *optimiser la sécurité et l'efficacité des avions*. On va centrer notre intérêt sur eux, car ils sont au cœur du grand Système de transport qu'est l'Aéronautique commerciale.

Depuis les années 30 où apparurent les PA[1], des perfectionnements incessants ont amené à une prise en charge quasi complète de la navigation par le FMS[2], de sorte qu'actuellement, la *conduite des vols* n'est pas loin d'être totalement automatisée : les pilotes peuvent (théoriquement) n'avoir à « prendre » les commandes qu'au roulage, au décollage, et éventuellement (en fait, fréquemment) en cas de perturbations[3]. En revanche, une vigilance soutenue est exigée en permanence pour prévenir et déceler les anomalies, et la *qualité des réactions de l'équipage devant l'imprévu* reste un facteur dominant de sécurité.

[1]PA, pilote automatique, ou AP, automatic pilot.
[2] FMS : Flight Management System, système de gestion de vol. Le plan de vol est préenregistré à bord et peut se dérouler, *si tout va bien*, aussi régulièrement et automatiquement qu'un programme d'orgue de barbarie.
[3] soit en moyenne de l'ordre d'une dizaine d'heures par an, sur les longs courriers (durée de roulage exceptée).

Puisque les automatismes actuels font « presque » tout le travail, certains futurologues n'hésitent pas à prédire qu'on pourra bientôt se passer de pilotes *à bord*. Mais c'est faire bon marché d'impératifs variés, dont ceux liés à la densité du trafic.

La nécessité de conserver un humain aux commandes reste jusqu'à présent évidente, bien qu'un transport aérien « tout automatique »[4] ne semble pas invraisemblable *a priori,* dans une perspective encore incertaine : on a déjà des métros et quelques véhicules routiers automatiques, les drones et les robots sont là, et l'informatique va partout, prête à tout faire, y compris apporter de l'intelligence artificielle. Alors, peut-être, si l'on y met le prix…

La tendance actuelle à augmenter une automatisation déjà presque omniprésente à bord est justifiée partiellement parce que la responsabilité humaine se trouve impliquée dans la majorité des accidents aériens, et que l'Homme, limité par sa nature, est moins perfectible que les machines. Actuellement, leur « intelligence » ne peut être mise en compétition avec la nôtre en toutes circonstances, et une coopération Hommes-machines restera indispensable tant qu'elles ne sauront pas faire face par elles-mêmes à tous les types de problèmes résolus par l'intuition et l'expérience des pilotes : les actions positives et souvent non recensées des équipages, pour éviter des incidents ou des désastres, sont considérablement plus nombreuses que les occurrences où des manœuvres erronées ont pu conduire à des accidents[5], cf. Livrets 1 et 4.

Mais la maîtrise d'un opérateur sur son matériel présuppose qu'elle puisse être exercée en profondeur : *ajouter plus de machinisme dans un avion très sophistiqué risque de surcharger un pilote au-delà de ses compétences*. On s'attache donc à orienter le développement des automatismes de bord pour que la correction de leurs défaillances ne devienne pas trop difficile en vol, et *on s'efforce de rendre ces matériels assez* ***résilients***[6] *pour qu'ils ne réclament que très rarement l'intervention des pilotes.*

On espère ainsi, dans un proche avenir, voir la prise en main du pilotage manuel justifiée seulement pour le maintien dans le domaine de vol *face aux aléas* (exceptionnels) de la météo et aux insuffisances des aides extérieures, (venant du sol et des satellites). Pourra-t-on aller au-delà ?

Plus d'automatismes ou « tout automatique », Vers l'autonomie ?

L'autonomie

Que pouvons-nous envisager avec des vols de plus en plus automatisés ? Sans doute faire un pas vers plus d'***autonomie***[7], c'est à dire transférer à la machine plus d'actions et de « **décisions** [8] » qui sont pour le moment l'apanage des pilotes. On sait déjà réaliser des engins volants totalement autonomes, comme

---

[4] Le Colloque AAE du 01-02/06/2016 à Toulouse, intitulé « Le transport aérien sera-t-il tout automatique en 2050 ? » a posé la question.

[5] Une implication de responsabilité (responsable mais non coupable !) relativement fréquente ne doit pas être confondue avec une intervention néfaste, extrêmement rare.

[6] **Résilience : terme applicable aux systèmes de toutes natures,** ***exprimant leur capacité à absorber une perturbation, à se réorganiser, et à continuer de fonctionner. Pour les machines, c'est la tolérance aux pannes, la possibilité d'autoréparation.*** **Pour les matériaux, c'est la résistance aux chocs. En psychologie, c'est la faculté de récupérer suite à un stress post-traumatique ….**

[7] **Autonomie : au sens étymologique, faculté de se gouverner par soi-même, suivant ses propres lois. Caractère de quelque chose qui fonctionne ou évolue indépendamment d'autre chose (Larousse).**

[8] **Certaines machines sont actuellement capables d'opérer par elles-mêmes un** ***choix rationnel*** **vers une solution** ***optimale***, c'est par exemple le cas d'un jeu d'échec pour ordinateur. Mais ce type de décision « machinale » est très restrictif, les décisions humaines s'appliquent à des configurations beaucoup plus étendues.

les missiles de croisière qui, une fois lancés[9] vers un objectif programmé, vont vers lui sans communiquer avec l'extérieur, en étant capables d'éviter les obstacles par leurs propres moyens de détection et de manœuvre. Mais le transport commercial de passagers doit satisfaire à bien d'autres contraintes !

L'autonomie implique une *capacité décisionnelle* : une machine totalement autonome devra posséder *en interne* des caractéristiques se rapprochant plus ou moins de celles d'un être vivant[10]. Ce n'est pas le cas dans un avion d'aujourd'hui, qui n'a pas d'*unité organique* et ne « fonctionne » qu'avec son équipage : *deux entités séparées*, l'une fabriquée, l'autre vivante, complémentaires dans leur dualité, et *communicant par l'interface Homme-machine*.

Les activités décisionnelles majeures relèvent, jusqu'à présent, d'un opérateur humain : concevoir, construire et faire fonctionner une machine résultent d'un *ensemble logique* (et cohérent) *appliqué au réel*, mais *guidé par la pensée* humaine. Notre faculté de penser peut échapper au déterminisme pour « *suggérer* » intuitivement des *décisions* dont les résultats (éventuellement innovants) peuvent être géniaux, ou parfois aberrants. Quant aux machines que nous savons créer *jusqu'à présent*, elles n'inventent pas et ne pensent pas (ou pas encore), à la différence des humains qui tentent toutefois de leur donner une « intelligence » artificielle, autorisant des décisions « non raisonnées » et peut-être, un jour, des « émotions ». En fait, seules les décisions dictées *par la seule logique* sont actuellement à la portée des machines dotées d'automatismes « classiques » : par exemple actionner un extincteur ou un dégivrage en cas de besoin détecté par des capteurs de température.

1- Une machine peut gagner en autonomie si on l'équipe de nouveaux dispositifs automatiques, sans qu'ils soient nécessairement « intelligents », c'est le cas d'un avion dont le PA est associé *séquentiellement* à un FMS.

2- On peut aussi vouloir obtenir une autonomie encore plus complète en intégrant des *fonctionnalités spécifiquement humaines*[11] *à l'intérieur de la machine*, par exemple en la dotant d'une « intelligence *artificielle »* censée *suppléer* celle des opérateurs.

On approfondira plus loin (Chapitre 2) la progression historique de cette évolution, qui a commencé en incorporant un « cerveau » à l'avion, sous forme de calculateurs mis en réseau et liés à un grand nombre de capteurs. Cette architecture numérique, bien ancrée à présent, se révèle capable de donner à l'appareil une « perception » et une « innervation » de plus en plus affinée, tendant à lui fournir les caractéristiques de base d'un ensemble « organique ».

Ainsi, progressivement, la contribution humaine au pilotage et à la navigation change de nature et la charge de travail diminue quantitativement[12], ce qui engage nombre de technophiles à envisager un « transport aérien tout automatique », avec des avions *autonomes*, sans pilotes à bord, qui bénéficieraient des deux stades d'autonomie 1 et 2. Actuellement, on n'en est encore qu'au développement du stade (1), mais on pressent qu'on est aussi à l'aube de ruptures d'origine NBIC[13], susceptibles d'amener vers le stade 2.

Commentaires sur la complémentarité homme-machine.

Un *corps* humain est un *organisme* naturellement déformable, formé de myriades de cellules ($>10^{13}$), finement innervé, et dont les parties sont indissociablement unies, *aucune n'étant disjointe des autres*.

[9] L'autonomie n'inclut pas la programmation du lancement et du plan de vol, qui relèvent de facteurs externes.

[10] Le missile de croisière se comporte un peu comme un pigeon voyageur qui sait rejoindre un lieu précis …

[11] Comme la *compréhension instantanée* d'une *perception visuelle complexe*, *motivant une action intuitive et immédiate*, par exemple reconnaissance, et *adaptation automatique* à la signalisation routière pour les automobiles.

[12] mais augmente corrélativement en exigences qualitatives.

[13] Nanotechnologies, biotechnologies, informatique et sciences cognitives.

Dans son unicité, cet ensemble garde sa *cohésion* en se prêtant à des mouvements très divers, mais *dont l'amplitude reste toujours limitée*.

Les machines sont très différentes et beaucoup plus « simples ». Les *mécanismes* sont traditionnellement construits à partir de *pièces détachées relativement peu nombreuses et généralement rigides, dotées de degrés de liberté mutuels* autorisant certains mouvements interdits aux êtres vivants, comme la rotation indéfinie d'une roue autour de son axe, base de notre ingénierie. Mais depuis quelques décennies, la « révolution informatique » introduit un nombre très élevé et rapidement croissant de microcomposants élémentaires, associés dans les processeurs et les mémoires de nos calculateurs ($>10^{10}$ transistors, doublant tous les deux ans d'après la « loi » de Moore …).

Comme dans les machines, nos raisonnements et calculs résultent d'*assemblages*. Des propositions ou données *indépendantes sont combinées et mises en relation algorithmiquement* (traitées dans nos ordinateurs). *Cette logique* qui constitue le lien entre l'Homme et les machines a suffi jusqu'à présent pour élaborer les automatismes et les robots qui *décident rationnellement* de leurs actions et peuvent accéder à un fonctionnement *autonome*.

Mais *la pensée humaine ne se réduit pas à la logique et au déterminisme*, car nous opérons aussi des *décisions* spontanées et irrationnelles, assez souvent positives … (justifiant la présence des pilotes à bord des avions ?).

Malgré nos progrès en nanotechnologies et nos recherches en « intelligence artificielle », nous sommes encore loin de savoir attribuer aux machines les performances *décisionnelles* dont un humain se révèle capable en activant ses milliards de cellules vivantes. Affiner nos techniques NBIC nous rapprochera sans doute d'un domaine biologique qui paraissait naguère inabordable, mais innover ne signifie pas forcément vouloir imiter la nature.

C'est toutefois de nos comportements psychologiques et physiologiques qu'a été inspiré le calcul numérique appliqué aux techniques neuronales et à l'apprentissage automatique (deep learning) : on appréhende ainsi des *perceptions* sonores, visuelles et tactiles *de plus en plus complexes*, étapes *préliminaires* de nos décisions ultimes, raisonnées ou intuitives. On peut grâce à ces nouvelles techniques viser à réduire la contribution humaine dans l'association homme-machine, en équipant les cockpits d'instruments *synthétisant la situation* d'un avion, et sa *dynamique*, de manière à en faciliter la compréhension et à inciter immédiatement les pilotes aux décisions les plus adéquates.

Parallèlement (ou « inversement »), l'automatisation basée sur la détection et l'analyse simultanée et en temps réel de nombreux paramètres *relevant d'actions ou même de simples intentions des pilotes*, peut leur servir de *prothèse* correctrice, pour commander des manœuvres permettant d'éviter les *effets falaise*[14], et pour effectuer éventuellement des mises en sauvegarde automatisées.

Mais il reste encore beaucoup à faire pour doter nos automatismes d'un ensemble de capacités décisionnelles permettant d'envisager une suppression des opérateurs à bord.

L'imprévu (cf. Livret 4)

Jusqu'à présent, la nécessité de pilotes est incontestée pour faire face à « l'imprévu », dont les occurrences sont considérées comme inévitables. Toutefois, les situations anormales réputées imprévisibles semblent être *presque* toutes *détectables*, sans être pour autant *identifiables* avec précision par nos technologies. **Les progrès en fiabilité et résilience des automatismes devraient permettre d'éviter *la reproduction des cas recensés d'imprévus dangereux*.** On serait alors conduit à la longue à **une augmentation d'autonomie allant jusqu'au niveau où l'efficacité des interventions humaines pourrait être mise en comparaison défavorable avec l'automatisation**. **Mais la quête des informations à collecter sera sans doute longue et laborieuse …**

[14] Altération brutale du comportement d'une installation, que suffit à provoquer une légère modification du scénario envisagé pour un accident dont les conséquences sont alors fortement aggravées. L'effet falaise a été surtout étudié dans le secteur des installations nucléaires.

L'imprévu ne se limite pas à une anomalie de fonctionnement ou à une défaillance d'un système de bord, il peut aussi provenir plus ou moins soudainement de causes extérieures, intempéries, turbulences, obstacles, interprétation erronée de communications avec le sol… Jusqu'à présent, la vigilance des pilotes doit s'exercer sans relâche pour une réaction prompte, elle peut se traduire aussi par l'*intuition* qu'une situation devient atypique insidieusement, cas difficile à déceler par un automatisme. D'où la justification de conserver à bord un responsable toujours en éveil, même dans un appareil dont le *fonctionnement normal* serait totalement autonome.

Nota : *Distinguons « imprévu » et « inattendu ».* Une situation inattendue se manifeste de manière imprévisible, mais peut être corrigée par un opérateur car la machine est censée être construite avec les fonctionnalités nécessaires pour un retour à la normale. Ce n'est pas le cas pour « l'imprévu » qui place la machine dans des conditions que son concepteur et-ou son utilisateur n'avaient pas envisagées.

La plupart des interventions positives des pilotes correspond plutôt à des situations inattendues, les cas d'imprévus étant généralement beaucoup plus difficiles à traiter.

En cas d'imprévu, des mises en mode dégradé et des procédures de sauvegarde doivent pouvoir être déclenchées automatiquement, c'est partiellement le cas dans les avions récents.

Les limitations et les moyens

Une théorie est parfois exprimée, (cf. Livret 3), suivant laquelle un automatisme « intelligent » restera incapable de décision « ultime »,

-parce que sa mémoire n'aura pu enregistrer des cas encore inconnus de situations anormales possibles,

-parce qu'il ne possèdera pas les algorithmes permettant de faire un *choix* entre plusieurs solutions qu'il peut proposer.

On rejoint là les limites reconnues des robots, réputés incapables d'innover. Mais s'agit-il prioritairement d'innover pour piloter des avions modernes, compte tenu de leur niveau déjà élevé de sophistication, ou plutôt de **respecter efficacement des procédures … « simplement » déterministes ?**

Rappelons que l'intelligence humaine peut résoudre des problèmes sortant du *domaine logique*[15], en apportant un supplément de « compétence »[16] hors de la portée des machines actuelles. Parallèlement aux progrès du calcul numérique[17], nos cogniticiens étudient comment notre *psychisme* vient *s'associer* à nos réalisations techniques où « l'intelligence artificielle » (IA) ne repose guère *jusqu'à présent* que sur des bases algorithmiques « classiques ». Ces bases sont sûres, mais pourrait-on les déclarer « suffisantes » pour un avion autonome (sans pilote) ? Devra-t-on lui appliquer nécessairement une intelligence artificielle *à l'image de la nôtre*[18], qui semble plus « complète », mais sujette à erreurs ?

---

[15] Entendons « déterminisme » ou « logique » au sens large : évolution liée généralement au principe de *causalité*, mais incluant aussi les non linéarités conduisant au chaos (sensibilité aux conditions initiales), les structures dissipatives, et plus généralement tout ce qui peut être *calculé* …. à la différence de l'*intuition* (irraisonnée).

[16] On tentera d'interpréter plus loin si, du fait de l'apport humain, on aboutit à une « machine augmentée », ou si les perfectionnements de la machine mis au service d'un pilote sont à considérer comme des prothèses qui font de lui un « humain augmenté », cf. « transhumanisme ».

[17] nous conduisant à réaliser non seulement des logiques neuronales « classiques », mais aussi d'autres systèmes fonctionnant par exemple à la manière d'un cerveau primitif, par « couches » successives.

[18] Par exemple, a-t-on *réellement* besoin, à bord, de calculateurs sophistiqués (issus de sciences cognitives), qui soumettent à l'apprentissage des masses de données issues de perceptions *aussi complexes que les nôtres* ?

La recherche concernant les vols autonomes d'avions de ligne passe peut-être par des voies plus conventionnelles méritant d'être davantage exploitées, et dont on pourra trouver l'amorce dans l'histoire de l'aviation :

- nos systèmes logiques classiques, nos algorithmes déterministes, ont encore de l'avenir devant eux pour augmenter *la fiabilité, la résilience, et la robustesse*[19] des systèmes. L'expérience acquise en vol, constamment en progrès, donne suffisamment de grain à moudre pour concevoir nombre de perfectionnements contribuant à plus d'autonomie.

- la vitesse du calcul numérique permet de surpasser le raisonnement humain dans toutes les investigations et prévisions relevant du déterminisme, par exemple dans les jeux d'échecs où le calculateur anticipe toutes les séries de futurs cas possibles plus vite et plus loin que les meilleurs champions. N'en va-t-il pas de même pour rechercher les causes de dysfonctionnement d'un système matériel formé de très nombreux composants ?

- et n'oublions pas qu'à la différence d'un missile de croisière, un avion de ligne autonome n'aura pas à être furtif. Au contraire, il communiquera en utilisant au mieux[20] toute les ressources extérieures venant du sol, des autres avions, et des satellites. Il bénéficiera d'informations mondialement réparties, mises au service d'une logique numérique intégrée à sa structure pour des prises de décisions à effectuer dans un cadre d'*actions multi-agents*[21].

Avec tous ces moyens, communiquer, coopérer, *et gagner en autonomie peuvent rester compatibles* en augmentant performances et sécurité avec les seules techniques du présent, en attente des futures conquêtes de la cybernétique.

Prudence et pragmatisme

S*i l'autonomie n'est pas considérée comme l'objectif principal*, le rôle des pilotes et de leur IHM (Interface Homme-machine) reste majeur et indiscutable : toutes les avancées en matière de comportement humain qui peuvent être apportées par les cogniticiens pour cerner les compétences des pilotes, et pour les enrichir par des *prothèses*[22], paraissent d'un intérêt essentiel.

Une *réduction des personnels techniques de bord*, (favorable économiquement), est généralement considérée comme un objectif limité à moyen terme, puisque l'autonomie totale manque encore de crédibilité : *un avion transportant des passagers impose en effet des contraintes sociétales et des exigences sécuritaires* qu'un engin militaire, ou spatial inhabité, peut ignorer.

La discussion reste ouverte, et tout en tenant compte d'options plus ou moins audacieuses, le plus simple et, peut-être, le plus « raisonnable », semble être de passer progressivement de la situation actuelle du transport aérien à une automatisation enrichie, par étapes visant à diminuer la charge des opérateurs navigants sans pour autant vouloir d'emblée leur disparition : on pense à la conduite du vol par un seul pilote (SPO) plus ou moins aidé par le sol (télé pilotage), en ayant en vue de tendre vers plus d'autonomie consécutivement à des expérimentations prolongées. C'est *la politique prudente des « petits pas »* qui a été suivie depuis les débuts de l'aviation. Elle traduit une *continuité historique* qu'on se propose d'analyser dans ce livret, et qui pourrait conduire, si elle se prolonge, à réduire la nécessité d'interventions humaines positives[23] à un niveau assez bas pour que le rôle du pilote s'estompe peu à peu. Mais ira-t-on jusqu'à l'effacement ?

---

[19] Un système « robuste » conserve la *stabilité* de ses performances malgré une large variation de paramètres pouvant l'affecter (par exemple la température).

[20] De manière autonome, de par l'interprétation, par la logique propre de la machine, des informations reçues.

[21] Systèmes multi-agents (SMA) : dans l'architecture d'un SMA, les agents (entités cognitives ou réactives), dotés d'une autonomie propre, interagissent et *distribuent* leur coopération.

[22] Y compris prothèses mentales (cf. livret 4).

[23] Il y a encore fort à faire puisqu'on estime *aujourd'hui* la fréquence de telles interventions « positives » à une par vol en moyenne.

Acquérir une vision d'ensemble de la situation actuelle et des difficultés potentielles de manière à présager des avancées du futur n'est pas une mince affaire. Comme dans toute démarche prospective*, il importe de tenir compte d'une dynamique émanant de l'Histoire*, et celle de l'Aéronautique, avec ses progrès et ses errements successifs, est riche en enseignements variés. On va tenter d'en extraire quelques faits saillants, et si possible quelques idées directrices en limitant et en centrant le sujet sur *le* ***rôle de l'avionique, en comparaison et en association avec celui des opérateurs à bord***. On insistera évidemment sur les développements les plus récents, liés aux techniques numériques, tout en constatant que certains d'entre eux résultent de véritables *constantes intemporelles*.

On ne saurait évoquer l'histoire aéronautique sans y faire figurer le rôle des pilotes dans les époques héroïques qui ont précédé et vu débuter le transport commercial, démocratisé seulement depuis nos dernières décennies. Le transport aérien repose sur un socle de dangers maîtrisés et d'efforts humains toujours présents dans nos arrière-pensées, ce qui conditionne certaines réticences à admettre qu'on puisse « prendre » un jour un avion autonome comme on prend un escalier mécanique ou un métro automatique. D'où le prochain paragraphe où le rédacteur n'a pas craint de remonter au déluge …

Premiers rappels historiques, jusqu'aux années 70

Avant toute automatisation

N'étant pas conformés pour voler, c'est par artifice que nous accédons à l'espace aérien, et il a fallu attendre le début du vingtième siècle pour que l'aviation naisse de rêves millénaires (Icare …) et de techniques avancées (propulsion allégée …). Après les sauts de puce de l'Eole d'Ader et les glissades motorisées des frères Wright en 1903, on est passé, en quelques années, de drôles de machines à peine capables de quitter le sol, aux ancêtres réellement pilotables[24] de nos avions.

La Manche fut traversée en 1909 par Blériot, la Méditerranée en 1913 par Garros, dix ans seulement après les premiers essais du « Flyer ».

Dès 1912, on avait expérimenté des automatismes aérodynamiques (Wright et autres) ou gyroscopiques (Sperry) pour faciliter le pilotage et pour améliorer la stabilité précaire des appareils légers et sous-motorisés de l'époque, (cf. **Annexe 1**). Il ne pouvait encore s'agir que de dispositifs *mécaniques* introduits plus ou moins empiriquement. La recherche de performances et l'art naissant du pilotage (ainsi que son côté « sportif ») n'encouragèrent guère à privilégier de tels artifices compliqués et coûteux.

Ainsi, en 1914, les instruments de bord se réduisaient à quelques contrôles du moteur (régime, température, jauge d'essence), du pilotage (anémomètre, altimètre, inclinomètre), à un compas et à une montre. Mais on s'entraînait à voler de nuit, par temps de brouillard ou de nuages bas, et le besoin d'aides à la navigation commençait à être ressenti.

Aux exploits de quelques centaines d'audacieux succédèrent alors les prouesses d'« as » d'une grande guerre où s'affrontèrent des milliers d'avions[25]. On apprit à compenser les efforts sur les gouvernes, et à maîtriser le compromis stabilité-maniabilité. On équipa les appareils d'observation en postes

[24] Wilbur Wright (1901): "Men already know how to construct wings or aero planes, how to build engines and propellers of sufficient lightness and power. Inability to balance and steer still confronts students of the flying problem. When this one feature has been worked out, the age of flying machines will have arrived".

[25] Près de 50000 appareils furent construits entre 1914 et 1919.

radiotélégraphiques, comme on l'avait déjà fait pour les dirigeables qui communiquaient avec les stations de radio maritime[26]. L'industrie de construction aéronautique est née en quatre ans.

La paix revenue, avec des pilotes démobilisés en masse chez les ex-belligérants, ce fut la décennie des grands raids dont les héros ont préparé nos lignes aériennes, pour la poste et les passagers. L'Atlantique Nord a été vaincu dès 1919, mais il fallut attendre 1927 pour que Lindbergh joigne New-York à Paris, toujours sans aucun dispositif automatique à bord.

Première phase d'automatisation, jusqu'à la Seconde guerre mondiale

Cette « préhistoire » des équipements de bord correspond à deux besoins majeurs : *faciliter le pilotage*[27]*, et autoriser la navigation aux instruments*[28].

Vers la fin des années 20, les vols de nuit et IFR sont devenus de pratique courante, avec l'apparition dans les cockpits des ADF (radiocompas) récemment inventés, et des premiers horizons artificiels. On communiquait alors en Morse avec les récentes infrastructures de radionavigation aéronautique, goniomètres *au sol* (MF-HF) qui transmettaient leur relèvement aux avions.

C'était le début des équipements automatiques de bord, mais chacun était tributaire d'un seul type de capteur (Pitot, variomètre, compas magnétique, gyroscope, compte-tours, thermomètre, manomètre ...), correspondant généralement à une indication unique sur un cadran à aiguilles, éventuellement avec réglages de zéro et de sensibilité.

L'encombrement des tableaux de bord augmentait dans le désordre[29] lors de l'apparition de chaque appareillage nouveau mis au service des pilotes, de leur mécano, du radio et du navigateur, dans les avions de ligne des années 30 nouvellement dotés de phonie VHF.

*Ainsi, e*ntre 1920 et 1930, les transports de courrier et de passagers se développèrent de jour et de nuit sur des distances n'allant guère au-delà du millier de kilomètres sans escale, avec l'aide des premiers instruments de bord gyroscopiques et radiogoniométriques. Le pilote restait sans relâche rivé aux commandes car les pilotes automatiques (PA) n'existaient pas encore sur les appareils commerciaux.

Rappelons (cf. § précédent) qu'on y avait songé pourtant depuis longtemps : avant 1914, on avait expérimenté des stabilisateurs d'assiette gyroscopiques et pendulaires. Mais *c'est seulement vers 1935 que furent installés sur des avions de ligne les premiers PA* dignes de ce nom, programmables manuellement, (non couplés à des systèmes de radionavigation encore inexistants ou insuffisants, et n'incluant la manœuvre des gouvernes que par des servocommandes proportionnelles), cf. **Annexe 1.**

Deuxième phase d'automatisation, l'avionique des années 40 aux années 70

Après la première guerre mondiale, l'Industrie aéronautique a commencé à se reconvertir pour produire des appareils sûrs et performants, destinés à des missions commerciales précises. Une organisation mondiale est venue progressivement règlementer leur usage, une infrastructure adéquate s'est créée, la

[26] La radiotélégraphie (TSF), dès son invention, a été expérimentée sur dirigeables (1910) et sur *un* avion en 1912, (pilote Joseph Frantz, suivi par Curtiss en 1913), mais jusqu'à la fin de la première guerre mondiale, l'Aéronautique utilisa peu « la radio », facile à capter par l'ennemi.

[27] réduire la charge de travail pour libérer les capacités du pilote vers les tâches essentielles et de haut niveau.

[28] s'affranchissant en particulier des limitations inhérentes au vol à vue.

[29] l'attention des premiers pilotes IFR de part et d'autre de l'horizon artificiel n'était pas encore organisée systématiquement autour du T basique (vitesse à gauche, altitude à droite, cap au-dessous).

conduite des vols est devenue *procédurale*. Le prestige des pilotes[30] s'en est trouvé quelque peu atténué dans la mesure où les voyages aériens se normalisaient en atteignant un bon niveau de sécurité.

Vint la seconde guerre mondiale. L'Industrie aéronautique, jusqu'alors surtout orientée vers la construction de cellules et de moteurs, évolua au-delà de cet objectif en développant l*'Avionique*. Grâce aux progrès de l'électronique de bord, des aides opérationnelles de premier plan purent être assurées, en particulier pour guider les bombardiers d'où furent issus un peu plus tard les premiers grands avions de transport : ils utilisaient *la phonie VHF*, et divers types de récepteurs de *géolocalisation hyperbolique* BF et MF.

L'UHF apparut pendant la guerre, avec les premiers radars sol et bord (et l'IFF : identification friend or foe). Au sol, les infrastructures radar, VOR, DME et ILS s'étoffèrent intensivement dans les années 50, qui marquèrent aussi à bord l'apparition des *centrales à inertie, bientôt raccordées aux PA*.

Les transistors (années 50) ont ouvert la voie au *calcul analogique*, *la théorie des asservissements et la simulation des équations du vol* ont transformé l'assistance au pilotage. Notons aussi, dans les années 50-60, l'organisation moderne du contrôle aérien et de la règlementation internationale, accompagnant l'apparition des jets commerciaux. La fin de cette période est marquée par les *atterrissages automatiques tous temps* CAT III de Caravelle (1969)[31] et les premiers vols du Concorde.

Dans cette période des 30 glorieuses, l'infrastructure au sol s'est étoffée largement, l'avionique est devenue une voie d'avenir dans l'Industrie aéronautique, et *le métier de pilote a changé de nature* : davantage de respect pour des règlementations de plus en plus étroites, moins de qualités physiques nécessaires mais plus de disponibilité intellectuelle au service d'un Système à mille facettes, souvent éblouissantes, et parfois obscures ….

Les cockpits étaient constellés de cadrans, dont la lisibilité et la répartition commençaient à faire l'objet d'études ergonomiques, compte tenu de leur redondance et de leur présentation séparée sur les tableaux des pilotes et du mécanicien.

La complexité des appareils exigeait beaucoup des équipages, il était temps d'introduire des transformations dans l'avionique, le calcul numérique est venu y pourvoir.

Ces rappels historiques sont développés dans l'Annexe 1 et le début du Chapitre 2.

Les pilotes dans la troisième phase d'automatisation

Elle a vu le jour avec le *développement des techniques numériques à partir des années 70*. On y consacre le **Chapitre 2**, compte tenu de son importance et de son actualité. Désormais, la part de l'avionique est devenue primordiale dans la conception des appareils civils et militaires, et *il importe d'apprécier son rôle* ***vis-à-vis de celui des personnels navigants techniques*** : une extrapolation futuriste sous forme de robotisation[32] risque en effet de dévaloriser et d'altérer gravement la fonction de pilote.

Au cours de l'Histoire de l'Aéronautique, la nature du métier d'aviateur a connu de grands changements. A ses débuts l'aviation a progressé spectaculairement, en grande partie grâce à l'art du pilotage, découvert et approfondi par des passionnés *faisant corps*[33] avec leur appareil. Une vocation forte est toujours présente dans la pratique des sports aériens, mais pour être pilote de ligne aujourd'hui les

[30] Distinguons cependant, de l'anonymat des pilotes de routine, la célébrité émergente des pionniers défricheurs de lignes aériennes internationales.
[31] précédé en 1966 par le Hawker-Siddeley Trident en CAT II.
[32] Au sens général où il s'agit de *remplacer* les comportements des pilotes par des automatismes.
[33] C'était textuellement le cas pour les planeurs de Lilienthal, et pour la Demoiselle de Santos-Dumont, nécessitant une véritable gymnastique corporelle ….

qualités, aptitudes, et compétences nécessaires *devraient*[34] être surtout celles de professionnels expérimentés, maîtrisant avec sang-froid des machines de haute technologie.

On verra dans les prochains chapitres comment l'apparition des calculateurs de bord a pu profondément transformer la conduite des vols en les automatisant. On l'a déjà mentionné, la majeure partie du temps est désormais consacrée au monitoring plus qu'au pilotage proprement dit : la manœuvre du manche à balai cède la place aux manipulations de boutons et de claviers, à la veille devant des écrans multifonctionnels …

On en vient donc à s'interroger sur ce qui reste, pour les pilotes de ligne d'aujourd'hui, de leur initiation sur avions légers, ou de leur formation de pilote militaire. Quelles qualités devra-t-on privilégier pour les opérateurs du futur, et pour quels appareils ?

Et même si l'on peut (difficilement) envisager un transport aérien sans pilote *à bord*, oserait-on imaginer une disparition du *métier* de pilote ?

Pourquoi avoir voulu automatiser ?

Après avoir esquissé dans les paragraphes précédents une première approche sur les automatismes, visant à apprécier l'écart qui les sépare encore d'une possibilité de vols autonomes, et après avoir décrit brièvement leur progression historique jusqu'à l'apparition des techniques numériques, on va maintenant tenter de qualifier certaines caractéristiques majeures qui ont contribué à justifier cette évolution.

En bref, disons qu'en automatisant on remplace ou on améliore certaines opérations humaines par des dispositifs contribuant à augmenter l'autonomie de la machine volante : on distinguera les *automatismes actifs* qui réalisent seuls des actions relevant primitivement d'opérateurs humains, et les *automatismes passifs* qui ne réalisent pas d'action, mais informent seulement les opérateurs sur la situation de leur machine, (cf. **Annexe 5**). On va considérer, (peut-être un peu abusivement), que les instruments et alarmes de bord, dans leur ensemble, entrent plus ou moins dans cette dernière catégorie, car ils *traduisent automatiquement* l'état d'un paramètre sous la forme d'une *indication* visuelle ou sonore.

1 Pour devenir pilotables, les premiers avions ont bénéficié de certains automatismes *actifs* « naturels » : une stabilité longitudinale structurelle résulte de l'adaptation de l'empennage et du centrage, la dérive corrige le lacet et le dièdre a un effet favorable (faible) sur l'équilibre transversal de roulis. Le contrôle du vol a été aussi facilité par les informations délivrées par des automatismes *passifs* initialement simplistes tels que la palette anémométrique (Etévé …), ou la « bille » détectant l'asymétrie latérale[35].

2 On a eu recours à partir des années 20 aux premiers instruments gyroscopiques ***opportunément*** *dérivés de leurs applications maritimes* limitées à conserver un cap. L'aiguille d'indicateur de virage, puis l'horizon artificiel, ont suivi pour l'aéronautique. A partir des années 30, les vols de nuit et sans visibilité du sol ont rendu ces instruments *passifs* indispensables et ont poussé à les perfectionner, en même temps que s'établissaient les règlementations IFR.

Les aides radio (et acoustiques) à la navigation maritime ont aussi opportunément offert à l'aéronautique des plateformes et des perspectives de recherche essentielles, tant au niveau des infrastructures (goniométrie, localisation hyperbolique) que des instruments de bord (détection d'obstacles et de reliefs).

De même, les progrès de l'électronique sont apparus au bon moment pour alléger les appareillages et accroître les performances des radiocommunications aéronautiques (passage à la phonie).

[34] L'accroissement très important du nombre nécessaire de pilotes risque, dans certains pays, de ne pas leur permettre d'assurer la maîtrise totale de matériels à haute technologie.

[35] A la limite, le fil de laine s'orientant dans le lit du vent est un automatisme passif, comme le pendule (la bille) ou la boussole (le compas).

3 Dès lors, *l'attention permanente nécessitée par le vol aux instruments* a justifié qu'il soit de plus en plus facilité, lors des vols de longue durée, par des aides *actives* au pilotage proprement dit, c'est-à-dire par des pilotes automatiques, inaugurés en vol commercial vers 1935 (sur DC3 et JU52).

4 Rappelons que l'*invention* d'automatismes de bord (mais pas leur mise en pratique) remonte en fait aux première années de l'aviation. La guerre de 14-18 freina leur application, car, pour les courtes missions de combat, on avait surtout besoin d'avions légers très maniables (plutôt que très stables), simples et robustes : les recherches abouties d'automatismes pendant le conflit semblent n'avoir guère concerné que le tir synchronisé à travers l'hélice, et probablement quelques servocommandes pour les bombardiers multi-moteurs de 1918, dont Sikorski (Ilya Mourometz) avait été un précurseur dès 1912. Si la guerre n'avait pas eu lieu, ce type d'avion aurait sans doute permis d'anticiper de quelques années le transport de passagers, et cristallisé la volonté d'automatiser …

On retiendra trois conclusions : **l'apparition des automatismes a répondu à des *besoins* (1, 2, 3), à des *opportunités* (2), et à une *continuité* (2,3)** mise en défaut en (4) par les priorités de la première guerre mondiale.

Bien que la guerre de 14-18 n'ait pas notablement contribué au développement d'automatismes aéronautiques, elle a incontestablement accéléré les progrès de l'aviation et offert au secteur civil, pour la décennie suivante, des monomoteurs de reconnaissance et de bombardement (tels que le Bréguet 14, cf. **Annexe 9**, début) reconvertibles pour le service postal : dépourvus du moindre dispositif automatique et seulement dotés de quelques instruments de bord rudimentaires, ils permirent de défricher nos lignes aériennes, en créant de nombreuses escales partout dans le monde, et en introduisant *la notion de trafic régulier, par tous les temps*.

Parallèlement, les grands bombardiers multimoteurs de la fin du conflit furent adaptés au transport de passagers (Farman Goliath …), avec des exigences de sécurité qui incitèrent fortement à imaginer des instruments de bord de plus en plus élaborés pour faciliter pilotage, navigation, et communications avec le sol.

Entre les deux guerres, cette expansion des équipements fut favorisée par les progrès de l'électronique (à lampes) pour la radiotéléphonie et la radiogoniométrie sol et bord. L'importance de *l'électricité de bord* s'accrut en même temps que se généralisaient les *servitudes hydrauliques et pneumatiques*, indispensables aux servomécanismes qui se multipliaient pour les commandes de vol, les contrôles moteurs, les changements de pas d'hélice, et les premiers trains rentrants. Ces moyens autorisèrent au cours des années 30 la création d'avions et d'hydravions intercontinentaux, visant parfois au gigantisme (Dornier Do X ...).

L'augmentation de rayon d'action des vols commerciaux incita à un virage technologique fondamental, en lui-même et pour ses conséquences, qui se fit plutôt discrètement au cours des années 30 : *l'arrivée commerciale des pilotes automatiques* (PA). Leur but initial était d'actionner gouvernes et commande des gaz afin de maintenir une valeur fixe de paramètres affichés par les instruments de bord : en bref, passer du stade passif au stade actif pour conserver un cap, une altitude, une vitesse et, plus tardivement, réaliser des virages d'inclinaison donnée entre deux caps affichés. Le PA était lié à la fois, en amont à des capteurs gyroscopiques et magnétiques, et en aval aux commandes de vol et de propulsion : c'était le premier exemple d'automatisme de bord complexe *à éléments fonctionnels multiples*. Notons aussi que le pilote automatique a été parfois limité à la stabilisation de trajectoire, et spécialisé sur avions de guerre en tant qu'aide à la visée ou à la ressource sur les bombardiers en piqué (Stukas).

Pendant la seconde guerre mondiale, (et à la différence de la première), l'automatisation des avions fit des progrès considérables. Sur des appareils rapides, lourds, et pour certains à long rayon d'action, les aides au pilotage et à la navigation devenaient d'autant plus nécessaires que les pilotes étaient souvent hâtivement formés. La Recherche appliquée a joué un grand rôle : la *théorie des systèmes asservis* s'est

développée à point nommé, en même temps que la *géolocalisation hyperbolique*, la mise en œuvre de l'UHF pour les *radars sol et bord*, ainsi que l'apparition des premiers transpondeurs.

Avec l'apparition des *transistors*, un ensemble de moyens de navigation variés et complémentaires s'est ainsi créé en peu d'années, et il a été complété dans les années 50 par l'apparition des *centrales inertielles gyroscopiques*, qui se prêtèrent rapidement à la liaison aux PA. Une navigation semi-automatisée s'instaura, mais les activités d'opérateur navigant étaient loin d'être abolies, les radômes de navigation astronomique au sextant apparaissaient encore sur les fuselages des premiers longs courriers à réaction de l'après-guerre.

On a détaillé en **Annexe 1** quelques épisodes de *ces trois décennies (50-80) où l'on vit les équipages se réduire de cinq à deux*. Cette période, qui nous a conduits jusqu'à la révolution informatique des années 80, a vu le transport aérien croître à peu près continument et rapidement, expansion qui n'a cessé de se prolonger jusqu'à aujourd'hui, avec un développement important des infrastructures aéroportuaires et radioélectriques. Cette tendance forte a été accompagnée de grands progrès en sécurité, dans le cadre d'un environnement géré internationalement par les Services de la Navigation aérienne. Un cadre précis de règlementations et de procédures a été défini et a transformé profondément le rôle des équipages, qui reste encore essentiel de nos jours au sein du Système de Transport aérien.

On traitera plus loin des *conséquences de l'apparition des techniques numériques à partir des années 70.* Mais notons que la tendance à renforcer l'automatisation à bord était déjà bien présente à cette époque charnière, elle avait résulté d'une longue expérience acquise avec les PA épaulés par les aides radio et radar à la navigation. Le prochain paragraphe s'appliquera aussi bien à cette période qu'à l'époque actuelle.

Pourquoi automatiser *toujours plus* ?

Sans traiter des techniques utilisées en automatisation, ce paragraphe concerne surtout le transport aérien des années 70 à nos jours, c'est-à-dire depuis la banalisation des « jets ».

1 Le ciel est de plus en plus encombré[36] et l'augmentation du nombre des avions intensifie, parfois jusqu'aux limites, un trafic dont certaines infrastructures approchent de la saturation. La sécurité est actuellement élevée, (probabilité d'accident $0.6.10^{-6}$/vol), mais il faudrait diviser par 4 les taux d'accidents d'ici le milieu du siècle pour ne pas voir s'amplifier le nombre annuel des victimes, compte tenu de la croissance prévue du transport aérien, (cf. dossier AAE n° 38).

Notons qu'indépendamment des problèmes de sûreté liés ou non au terrorisme, l'environnement du transport aérien peut aussi évoluer en engendrant des menaces sur la sécurité, du fait d'une pression économique toujours croissante, d'une sévérité accrue des phénomènes atmosphériques, d'attentes d'un public exigeant en matière de régularité …

2 Les accidents d'avions incriminent les Hommes plus que leur matériel, le plus souvent sous forme de défaillances dans la relation Homme-machine, les statistiques établies depuis plusieurs dizaines d'années le prouvent sans ambiguïté. Le progrès technique, s'il est bien orienté, doit permettre aux machines de gagner à la fois en fiabilité et en performances, *sans limite envisageable,* tandis que les possibilités humaines resteront contraintes par la nature. D'où l'idée logique, mais quelque peu simpliste, de *substituer* des opérations automatisées à des actions d'opérateurs, objectif radical qui sera infléchi et nuancé plus loin.

[36] Le développement des pays émergents, l'expansion démographique, et les progrès techniques, transforment les modes de vie et font croître la mobilité, en particulier sous forme d'une hausse régulière et importante du transport aérien, entre 4% et 6%/an suivant les régions du globe, plus que le PIB mondial (hausse voisine de 3,5%/an).

3 Les *calculateurs de bord*, initialement analogiques dans les 60-70, puis les calculateurs numériques, ont révolutionné en quelques années les techniques de communication et d'automatisation. Parallèlement, les travaux des cogniticiens ont abordé la simulation des comportements cérébraux, qu'on espère aujourd'hui pouvoir associer étroitement au fonctionnement des machines.

4 L'Histoire de l'Aéronautique a commencé avec des appareils rudimentaires, leur efficacité devait beaucoup aux qualités des pilotes. On a peu à peu perfectionné les avions en leur ajoutant de nombreux automatismes dont le plus fondamental, bien nommé, est le PA. D'abord simple stabilisateur d'assiette longitudinale et d'inclinaison à ses débuts, puis conservateur d'altitude et de cap, il a été doté progressivement de fonctions de plus en plus sophistiquées. Rappelons qu'en étant lié au FMS il autorise maintenant la programmation de vols presque entièrement automatisés et que, de ce fait, le temps consacré au véritable pilotage manuel s'est réduit à quelques heures par an et par pilote.

5 Mais ces instants sont consacrés à des *tâches de haut niveau*, inaccessibles aux automatismes actuels. Les progrès escomptés permettront-ils de réaliser des avions commerciaux encore plus autonomes[37] ? Le récent « phénomène drone »[38] y fait songer.

En résumé :

1) exprime le besoin d'améliorer la sécurité dans les années à venir (Objectif)

2) incite à y parvenir grâce aux progrès des automatisations (Procédé)

3) calculateurs et travaux de cogniticiens sont à la base des progrès (Constat)

4) l'accroissement continu des fonctionnalités du PA est un fait marquant (Historique)

5) ira-t-on vers plus d'autonomie des avions commerciaux ? (Question).

Quel sens donner à « plus d'automatisation » ?

Partant de l'actuel, mais en considérant l'évolution depuis les années 70, on va citer quelques *objectifs potentiels*, en présentant des *arguments favorables* dont il convient de discerner *les limites*.

La période récente a été particulièrement riche en innovations de toutes natures depuis une trentaine d'années, et la « révolution informatique » introduit désormais des transformations profondes dans l'ensemble des techniques de l'Aéronautique. On interprétera certaines d'entre elles comme un apport de divers types de « prothèses ».

Objectifs potentiels

**Difficultés* : Il n'est pas facile de « rester dans la course » : les progrès rapides en puissance de calcul et en mémorisation amènent à des mises à jour et à des renouvellements de matériels souhaitables à l'échelle annuelle, alors que la durée de vie des avions commerciaux se chiffre en décennies. D'où quelques problèmes pour gérer la maintenance, et produire des appareils durablement compétitifs à partir de leur conception initiale. Ces difficultés imposent une grande réactivité aux bureaux d'études.

**Objectifs* : Pour pallier les insuffisances humaines et celles des équipements :

- la détection et la neutralisation d'interventions erronées des opérateurs à bord et au sol est une mission de sécurité-sûreté qu'on envisage de confier à des automatismes,

[37] Entendons ici « augmentation d'autonomie » dans le sens où un pilote est de moins en moins sollicité grâce à l'aide d'automatismes permettant de diminuer sa charge de travail.

[38] En France, le premier vol d'un avion sans pilote télécommandé a été réalisé en 1917 (Détable-Boucher), comme aux USA (Sperry-Hewitt). Les premiers « drones » (faux-bourdons) anglais étaient des Tiger Moth servant en 1935 d'avions cibles télé-pilotés.

- améliorer le pilotage grâce à l'automatisation semble primordial en cas de manœuvres manuelles d'urgence et en vol dégradé,

- automatiser davantage et mieux communiquer pourront contribuer à fluidifier le trafic, régulariser les mouvements, augmenter leurs fréquences et simplifier les procédures tout en préservant la sécurité,

l'automatisation pourrait conduire à réduire les équipages à un seul pilote, voire à rendre les avions autonomes à plus long terme. On trouvera en **Annexe 2** quelques considérations destinées à situer ce problème, en particulier vis-à-vis de l'évolution des liaisons air-sol.

**Contraintes* : Les études et les projets ne manquent pas mais le sujet est vaste, et nécessite des financements importants, assortis d'impératifs éthiques et sociétaux.

Sur le plan règlementaire, les spécifications de certification pour avions de ligne de l'EASA (CS-25.1309) et de la FAA sont précises et basées sur des approches probabilistes régulièrement amendées. Les probabilités d'anomalies à corriger sont faibles, et la qualité des résultats déjà acquis dans l'exploitation du transport aérien n'engage pas aux mutations hasardeuses.

Quelques éléments favorables

**Progrès de l'automatisation* : Dans les automatismes modernes, l'opérateur doit maîtriser matériels et logiciels (surveillance, validations, choix et changements de modes …), et, de son côté, le système peut avoir à détecter (alarmes), modifier, ou interdire, des actions humaines non adéquates (ex : traitement d'anticollision et maintien dans le domaine de vol).

Déléguer la responsabilité d'une manœuvre à l'homme ou à l'automatisme, ou la partager, est un choix souvent difficile et parfois vital. Les deux processus sont imbriqués, on veut l'un ou l'autre ou l'un et l'autre suivant les circonstances, et **des incompatibilités existent, qu'on envisage de corriger par des compléments d'automatisation. Jusqu'à présent, c'est au pilote de décider s'il doit « laisser faire » ou « prendre la main », mais les progrès de l'intelligence artificielle sont rapides, et des solutions « mixtes » apparaissent.**

**Accroissement de fiabilité* : rappelons qu'au stade actuel la programmation des vols (pré-vol et en cours de vol), permet « théoriquement » de les effectuer en mode totalement automatique à l'exception du roulage au sol, et du décollage (dont l'automatisation complète fait l'objet d'expérimentations). Toutefois, imaginer qu'en pratique courante l'intervention humaine devienne inutile reste en question en raison des nombreuses situations imprévues ou inattendues auxquelles un équipage est confronté, pratiquement à chaque vol. Mais les performances et la diminution de coût des systèmes informatiques s'étendent rapidement[39]. Si leur fiabilité est reconnue supérieure à celle des humains *pour des tâches définies*, et *si la fréquence des situations critiques peut être diminuée grâce à des équipements nouveaux*, on pourra envisager de *reconsidérer* les fonctions de pilotage, de navigation, et de communications.

**Améliorations du système air-sol* : l'automatisation en Aéronautique n'intéresse pas seulement la réalisation des vols, elle est aussi présente dans les autres secteurs du transport aérien, Services de la Navigation aérienne, Compagnies et Aéroports. Les communications terrestres, aériennes et satellitaires y contribuent en développant maintes possibilités d'intégration et de fédérations en réseaux[40].

Insistons sur le rôle fondamental des Services de la navigation aérienne, sans lesquels le trafic aujourd'hui très dense des avions de ligne serait irréalisable, et sur la **symbiose, désormais bien établie mais toujours perfectible, entre les opérateurs navigants, les Compagnies aériennes, et la**

[39] tendances moins marquées pour les systèmes électriques et mécaniques. La qualité des composants, et l'intégration de systèmes experts, permettent d'aboutir à une robustesse, à une résilience, et à un niveau de performances surpassant les capacités humaines dans la plupart des situations où la logique est en cause. De nombreux systèmes automatiques sont redondants, certains sont même «autoréparables» par voie logicielle.

[40] Ces questions sont à l'ordre du jour dans les programmes internationaux tels que NextGen et SESAR.

logistique aéroportuaire : dans cet ensemble de base du Système de Transport Aérien, *les progrès de l'automatisation et des communications vont de pair*. Comment les optimiser dans *la perspective d'une aviation comprise en tant que* ***système air-sol*** **?**

Limitations actuelles des automatismes

Limitations technico-économiques* : Les *ruptures* envisageables vont bien au-delà des *progrès* concernant les équipements de pilotage et de navigation, les commandes de gouvernes, et les contrôles de moteurs : la percée des drones fait rêver certains à des changements radicaux, avions de ligne sans pilote ou dotés d'un équipage réduit. Mais **pour y songer à court terme, beaucoup d'impondérables existent, dont la plupart sont liés à la flexibilité obligée des missions[41], et à la nouveauté dans l'expérimentation des drones dont la fiabilité semble encore très insuffisante.

Le gigantisme du trafic mondial, sa diversité et sa densité, ne faciliteront pas l'exécution rapide de transformations profondes, compte tenu de la transition nécessaire entre procédures anciennes et nouvelles, et de la coexistence d'appareils d'âge et de types différents. Quel degré d'innovation et d'audace peut-on raisonnablement se permettre ?

**Déshumanisation à risques* : Il faut éviter qu'une automatisation maladroite ou excessive ne déresponsabilise des personnels responsables d'enjeux majeurs, exposés à une appréciation insuffisante ou erronée des phénomènes mis en jeu dans maintes situations où l'intervention humaine peut se révéler décisive face à l'inattendu. On devra *prouver que tout nouvel automatisme associé ou substitué à un comportement humain apporte un bénéfice global sans être créateur d'artefacts nuisibles*. Comment s'en assurer, compte tenu de la haute fiabilité déjà obtenue, offrant peu d'occurrences de défauts détectables ?

**Insuffisances au stade décisionnel* : Un opérateur est débordé quand il doit surveiller un nombre trop élevé de paramètres dont certains prennent soudain des valeurs critiques. *Une hiérarchie des traitements de données est à ajuster aux circonstances, un automatisme bien conçu peut y aider en présentant une synthèse d'informations combinées, mais il sera souvent incapable de rivaliser avec l'homme pour maîtriser les stades ultérieurs de compréhension et d'actions urgentes*.

**Nécessité de cohérence* : Tout nouvel équipement ajoute de la complexité, et des possibilités de défauts d'intégration dans un système avion déjà sophistiqué. *Il faut être assuré qu'une cohérence globale est respectée, qu'on ne va pas créer des possibilités de manœuvres automatisées contradictoires, et que leurs tentatives de correction par l'homme pourront être exécutées sans risque d'aller à contre-sens.* On reviendra plus loin sur ces problèmes en évoquant divers accidents survenus pour ces raisons.

Maintien du rôle des pilotes dans la continuité historique

Ce paragraphe aborde les problèmes de sécurité, en relation avec les comportements humains considérés dans le cadre historique des automatismes de bord qui ont abouti à l'avionique moderne. Cette évolution concerne surtout la conduite des vols, plus que les systèmes internes, et elle a conservé, au cours des décennies, des caractéristiques spécifiques et fonctionnelles dont la continuité apparaîtra dans le paragraphe suivant (constantes historiques).

**Remédier aux insuffisances humaines* : Les causes humaines sont incriminées dans plus de la moitié des accidents mortels. Certains comportements inappropriés des équipages mis en cause dans les catastrophes aériennes sont analysés dans d'autres livrets, où diverses études récentes sont commentées. Elles cernent les défaillances du « matériel humain », soumis au minimum à une probabilité non négligeable d'incapacités physiologiques et psychologiques survenant en vol. Pour y remédier, on

[41] due à la météo et aux changements d'horaires ou de routes imposés par le Contrôle.

souhaite faciliter ou supprimer de nombreuses tâches des pilotes[42] en les confiant à des équipements « intelligents » dont les performances et les interfaces avec l'humain ne pourront que s'améliorer sans cesse au rythme des progrès[43]. Mais les automatismes du futur pourront-ils interdire aux humains d'agir malencontreusement dans *toutes* les situations critiques ?

**Sécuriser l'usage du PA* : Le pilote automatique, utilisé depuis 80 ans et perfectionné sans cesse, offre un exemple significatif : initialement reconnu indispensable dans les vols de longue durée pour diminuer la fatigue physique des pilotes, le PA a vu ses fonctionnalités augmenter jusqu'à gérer toutes les phases d'un vol préprogrammé. On reviendra sur les problèmes, en cours de résolution, liés aux désengagements-réengagements de PA parfois dangereux en configurations critiques, compte tenu de l'adjonction de nombreux dispositifs annexes introduisant des risques d'incompatibilités difficiles à corriger.

**Pas d'autonomie envisagée à court terme* : Rappelons que malgré les progrès rapides de l'IA, de la robotique, et des drones, envisager d'ici 2050 des avions sans équipage pour le transport de passagers semble peu réaliste. Notons cependant que des vols expérimentaux avec « sense and avoid »[44] automatisé ont déjà eu lieu[45], et que diverses applications au transport de fret semblent au stade du pré-développement. En attente de résultats probants plus nombreux et confirmés, on doit tenir compte :

- du taux de crashs élevé des drones actuels,

- du degré de fiabilité satisfaisant acquis sur les avions d'aujourd'hui,

- de la prudence nécessaire pour faire évoluer un grand système tel que le transport aérien.

Dans ce livret consacré à l'historique des automatismes aéronautiques, plutôt qu'à leur futur, on ne prendra pas en considération des solutions technologiques aussi radicales que l'autonomie totale d'appareils de transport civil sans personnel navigant technique (PNT) à bord. En revanche on n'exclura pas d'étudier la faisabilité d'avions mono-pilotes (SPO) assistés plus ou moins activement par le sol *à la lumière des réalisations déjà existantes*. Cf **Annexe 2**.

**Complémentarité homme-machine* : Pour suppléer aux insuffisances des hommes, on va donc se borner, comme dans le passé, à envisager des améliorations dans la conduite des appareils, résultant de compléments d'automatisation et de communications. Perfectionner les équipements et les procédures d'utilisation des avions sera vu avec l'objectif principal de corriger dans les actions humaines celles qui risquent de ne pas être assez sûres, en leur *associant*[46] des opérations automatisées plus fiables et plus efficaces, et en établissant une complémentarité *coopérative* entre l'Homme et sa machine. Un autre objectif est de prévenir les défaillances, en particulier les défauts de vigilance et la fatigue.

**Continuité historique* : L'Histoire de l'Aviation a suivi cette voie depuis ses débuts, avec des introductions successives d'automatisations visant à aider le pilote *sans diminuer ses responsabilités* ni ses possibilités de manœuvres volontaires. Notons seulement ici qu'indépendamment de l'époque d'apparition des innovations, une évidence historique s'est toujours manifestée : la cohésion étroite et spécifique entre l'homme et *une machine exigeante à l'égard de la qualification des personnels qui la servent*. C'est dire que *les progrès technologiques dans les avions nécessitent constamment pour les pilotes, assez généralement, et en parallèle, une acquisition de compétences nouvelles en complément ou remplacement des anciennes*. *Dans ces conditions, la formation théorique des pilotes est en risque de se révéler insuffisamment adaptée aux besoins.*

---

[42] une fois connues et triées les circonstances où ils ont sauvé des situations banales et courantes.
[43] afin de diminuer les risques d'erreurs de perception, d'interprétation et de choix en situations difficiles, inattendues, rapides, ou-et dangereuses.
[44] « détecter et éviter » : pour anticollision et perturbations météo, dans le trafic civil, en pilotage automatique complet « gate to gate ».
[45] Exemples : projet BAE-ASTRAEA sur JetStream 31, pilote robot coréen PIBOT, …
[46] et non en leur *substituant systématiquement*, dans la majorité des cas …..

On reviendra plus loin à plusieurs reprises (dont **Annexe 9**) sur la « nécessité historique »[47] de ces pilotes qui ont, certes, été amenés d'année en année à « tenir le manche » de moins en moins souvent, à présent quelques minutes seulement, en moyenne, par heure de vol : on l'a déjà noté, le « pilotage » traditionnel devient obsolescent sur les avions d'aujourd'hui, gérés en quasi-permanence par le PA. Il s'agit surtout de savoir veiller sans relâche au bon comportement des automatismes, et de pouvoir remédier à leurs anomalies. Ces tâches réclament généralement au cours de chaque vol plusieurs interventions positives, *brèves et pas toujours recensées*, dont l'absence ou l'erreur d'adéquation aurait pu être parfois fatale[48]. *Cette constatation semble indépendante du degré de sophistication apporté aux appareils, qu'ils soient anciens ou récents* : *le pilote a été et reste indispensable, malgré les changements de nature que le progrès a pu jusqu'ici apporter à son activité*.

**Dualité technique et opérative* : En abordant les aspects historiques de l'Aéronautique sous l'angle de son enrichissement *chronologique* en automatismes, on va être amené à considérer les équipements à la fois au point de vue (matériel) de leur intérêt technique, et au point de vue (humain) de leur mise en œuvre.

Notons que la coopération entre cogniticiens et ingénieurs automaticiens, en faveur aujourd'hui, accompagne le développement des techniques numériques, en particulier neuronales, mises au service des études d'intelligence artificielle. ***Le « fonctionnement » de l'homme est de plus en plus rapproché de celui d'une machine « super-intelligente », et, une fois doté de « prothèses » comblant ses lacunes, l'humain « augmenté » est envisageable comme une partie de système fusionnant avec le matériel qu'il sert et qu'il domine à la fois***.

Mais constatons aussi qu'en collaborant étroitement avec les automaticiens, les concepteurs d'avions avaient eu déjà depuis longtemps le souci de faciliter et sécuriser le pilotage en étant conscients de l'importance du facteur humain pour l'efficacité de leurs réalisations. Ces *deux aspects, matériel et humain*, sont indissociables et sont réunis au travers de *constantes historiques* applicables à l'Aéronautique à tous les stades de son évolution.

Constantes historiques des automatismes aéronautiques

Spécificités

Facteur temps imposé* : La tendance à l'automatisation progresse dans tous les modes de transports, cf. **Annexe 3, mais le contexte aéronautique est, et a toujours été, très particulier : en cas de difficultés on ne peut pas arrêter un avion en vol pour « prendre le temps » de résoudre un problème, *le facteur temps est imposé par la machine et non par son conducteur*. Cet aspect dynamique est contraignant mais essentiel, il peut justifier qu'un avion-robot puisse être un jour meilleur qu'un avion conduit par un pilote, car un automatisme est a priori toujours améliorable en temps de réponse et précision, il peut avoir des réactions plus rapides (et éventuellement plus sûres) que celles d'un humain. La question est de savoir si leur qualité sera équivalente quelles que soient les circonstances.

**Adaptation des temps de réponses aux situations* : Les temps de réponse exigés pour intervenir en cas d'incident ont toujours été très variables suivant les phases du vol, les conditions météo et les risques de collision. Les « effets d'inertie » dans les appareils de grande taille imposent moins de « réflexes » instantanés mais exigent plus d'actions dosées, réfléchies et anticipées. Remplacer *dynamiquement* une action humaine par celle d'un automatisme exige de la part de la machine une « prise de conscience » artificielle de situations très diverses. Ce problème de haut niveau constitue une difficulté majeure dans le développement « intelligent » des PA, pour lesquels une *gestion coopérative* de la part d'un pilote semble devoir rester indispensable.

[47] bien qu'elle soit désormais mise en doute pour l'avenir, par ceux qui arguent du « phénomène drone ».
[48] Comme on l'a déjà mentionné au tout début de ce chapitre 1.

**Complémentarité homme-machine* : La « pensée » d'un opérateur bien formé et expérimenté se nourrit par la mémorisation de faits très nombreux, conséquences d'un apprentissage qui rend les mécanismes cérébraux aptes à interpréter « presque » instantanément une réalité complexe, *non soumise à une algorithmique prédéterminée*, ce que les robots « intelligents » tentent d'imiter, mais jusqu'ici avec des résultats inférieurs.

En revanche, les machines ne sont pas sensibles à la fatigue, au stress, et aux pertes de vigilance, elles sont incomparables en vitesse et en efficacité dans des configurations *déterministes*, elles peuvent opérer en *multitâches parallèles* inaccessibles aux humains, qui ne savent gérer simultanément qu'un nombre très réduit de concepts indépendants[49].

Cette complémentarité homme-machine a toujours orienté d'une part la formation des personnels navigants techniques, et d'autre part la mise à leur disposition d'équipements adaptés. *Faciliter la tâche des pilotes par plus d'automatisation n'est pas une simple « instrumentalisation » de leur fonction, c'est une « symbiose »* nécessaire pour plus d'efficacité et de sécurité, qui justifie de longues périodes d'entraînement en vol et en simulateur. C'est aussi une des raisons qui ont rendu particulièrement attractifs les métiers de l'Aéronautique depuis leur origine. Mais prenons garde, pour l'avenir, à ne pas générer l'« ennui » dans les cockpits en réduisant l'activité des pilotes à un monitoring consistant à surveiller fastidieusement des systèmes de plus en plus fiables et rarement pris en défaut.

Caractéristiques intemporelles

Les nombreuses catégories d'automatismes peuvent être classées suivant leurs fonctions, leur technicité, leurs conditions d'emploi, etc. On a retenu dans ce livret trois caractéristiques marquantes qui apparaissent comme des constantes dans l'évolution historique de l'Aéronautique : *appartenance, niveau, et fonctionnalité active ou passive*.

Appartenance à la machine ou à l'humain (prothèses)

Un dispositif automatique n'est pas forcément envisageable comme une partie de machine, il pourra être rattaché directement à un opérateur humain. On emploiera dans ce cas le terme de *prothèse* réalisant une *hybridation*. Exemples : combinaison anti-g, vision tête haute augmentée de nuit et en nuages, lunettes connectées à des warnings, apport d'oxygène ou médicament administré automatiquement en cas de besoin (malaise, perte de vigilance).

Ces prothèses sont utilisées jusqu'à présent surtout par les pilotes militaires, reconnaître la nécessité de leur extension dans le secteur civil est à discuter, bien que le traitement automatisé de stress, fatigue et défaut de vigilance puisse être souhaitable en toutes circonstances.

L'apparition récente d*'objets connectés* contribuera sans doute à augmenter le nombre et la fonctionnalité des prothèses, appelées à évoluer, mais la notion elle-même est intemporelle, si l'on entend par prothèse, au sens large, un dispositif automatique ou non destiné à rendre un opérateur plus performant[50]. *Si cet opérateur est envisagé lui-même comme un automatisme super-intelligent*, les équipements avioniques spécialement adaptés à ses compétences peuvent être considérés comme des prothèses mises à sa disposition. C'est le point de vue adopté quand on développe le concept de *prothèse mentale*, ouvrant sur l'interface et sur la coopération homme-machine un champ d'investigations directement inspirées par la physiologie et la psychologie humaines, (cf. **Livret 4**).

Notons que la *formation* des PNT[51] peut contribuer à les garantir contre une fragilité du comportement, et à rendre « plus automatiques » des réactions cérébrales et gestuelles favorables à l'efficacité, créant ainsi un complément acquis qui peut être considéré comme une sorte de prothèse « virtuelle ». Les besoins du pilotage devenu très procédural imposent en effet de nombreuses manœuvres à effectuer

[49] cf. par exemple « L'humain augmenté » CNRS Editions, p. 75.
[50] Combinaison de vol, casque et lunettes, planchette et règle Cras à l'époque héroïque, et encore de nos jours montre et Ray-Ban pour la panoplie folklorique et traditionnelle … une calculette est aussi une sorte de prothèse.
[51] PNT : Personnel Navigant Technique, actuellement Commandant de bord et copilote.

« machinalement », mais il est évident qu'on doit « instrumentaliser » le moins possible le travail des pilotes et des opérateurs au sol, la conception des automatismes du futur devra en tenir compte.

Niveau des automatismes

C'est un critère pragmatique lié à la difficulté des tâches dévolues : un automatisme de bas niveau fonctionne sans assistance humaine car sa mission est simple, tandis qu'un automatisme de haut niveau doit être maintenu sous contrôle et fonctionne avec divers choix de modes. S'il est confronté à des situations dépassant sa compétence, il devra être déconnecté ou rendu compatible avec des manœuvres correctives opérées par le pilote, (exemple : PA en vol dégradé).

Les avions contiennent des automatismes de toutes catégories, allant du plus bas au plus haut niveau, avec des degrés croissants de sophistication apparus au fil du temps. Au bas de l'échelle figurent les contacteurs « tout ou rien » pilotés par des thermostats (ex : réchauffeur de dégivrage) ou des pressostats, pour lesquels l'intervention humaine est nulle ou se réduit à la surveillance d'un voyant.

Le sommet de la hiérarchie est celui des *systèmes asservis* qui se perfectionnent sans cesse depuis 7 ou 8 décennies. Les plus complexes et les plus modernes, à *résilience* élevée, ont des calculateurs internes qui assurent un fonctionnement optimisé, et analysent les anomalies éventuelles en formulant des diagnostics élaborés. L'intuition et la réflexion d'un humain compétent interviennent pour modifier des réglages, mais seulement « en bout de chaîne » car ces appareillages sont dotés d'un haut degré de *transparence* pour l'utilisateur[52]. Les asservissements de haut niveau des avions modernes utilisent souvent plusieurs *entrées redondantes et complémentaires*, leurs sorties sont calculées par un simulateur de lois de comportement, puis comparées aux signaux d'entrée par des détecteurs d'écarts associés à des boucles de retour assurant à la commande son efficacité en *performance et robustesse*, (cf. **Annexe 6**).

Automatismes passifs et actifs

Amorcée pendant la guerre de 14-18, l'étude des instruments de bord aéronautiques, qui a conduit bien plus tard à l'« avionique », (années 50), a permis de discerner des automatismes « actifs » qui exercent des actions qu'il faudrait effectuer gestuellement ou verbalement s'ils n'existaient pas, et, par opposition, des automatismes dits « passifs » qui produisent seulement des traitements d'informations. (Rappel du § « Pourquoi avoir voulu automatiser », début, et cf. **Annexe 5**).

*Les *automatismes passifs* : Ils secondent l'homme dans les opérations de surveillance et de contrôle. Ils ont évolué en synthétisant des données primaires transformées en données plus élaborées combinant généralement plusieurs données de base, afin d'en faciliter l'interprétation[53]. Sur les avions modernes, ils informent un pilote (sur les PFD [54] et MFD [55] de glass cockpit) sans agir à sa place sur les commandes[56], ou renseignent au sol un contrôleur (visualisations sur ses écrans) sans formuler ni émettre

---

[52] C'est le cas des pilotes automatiques modernes qui maintiennent les conditions de vol nominal, et qui savent aussi conjuguer les commandes et amortir les turbulences. Ils exécutent des programmes de trajets prédéfinis (plan de vol), avec prise en compte des données émanant de centrales à inertie, elles-mêmes recalées automatiquement par divers appareils de radionavigation et de géolocalisation (dont GNSS-GPS) … La complication de tels systèmes impose une coordination optimale de leurs multiples composants inter-agissants dans toutes les configurations de vol, ce qui ne peut s'effectuer que par voie logicielle au moyen de calculateurs temps réel.

[53] Un des premiers automatismes passifs est sans doute l'ADF (Automatic Directional Finder), apparu peu avant 1930, dont l'aiguille s'oriente automatiquement vers le *gisement* d'un radiophare omnidirectionnel NDB (Non Directional Beacon) lorsque le zéro du cadran indique l'axe du vol. L'ADF est automatisé sous forme de RMI (Radio Magnetic Indicator) si son cadran (rose de cap) mobile est asservi au compas magnétique par un *conservateur de cap* gyroscopique. Le RMI fournit alors directement le *relèvement* de la station, (radiale QDM = cap + gisement), indication plus synthétique que celle du gisement, et qui résulte de l'*intégration* de deux équipements distincts, ADF (radiogoniomètre embarqué) et conservateur de cap (compas magnétique + directionnel gyroscopique).

[54] PFD : Primary Flight Display.

[55] MFD : Multiple Functions Display.

[56] Exemples : directeurs de vol (FD sur PFD) et suivis cartographiques (sur MFD).

les messages à transmettre. Des informations redondantes émanant de plusieurs automatismes passifs sont souvent comparées automatiquement pour faciliter la tâche d'un opérateur[57], responsable final de décisions à prendre en cas de doute ou de désaccords entre informations discordantes, (Ex. ECAM[58]).

L'amélioration d'ergonomie dans les automatismes passifs est essentielle, puisque leur rôle est de *sensibiliser les opérateurs et les inviter à agir en cas de besoin* : un automatisme passif fiable ne doit pas seulement posséder des qualités d'affichage, il doit aussi et surtout fournir une indication à *signification intentionnelle* sans risque d'interprétation erronée, il doit conduire la pensée de l'observateur vers des actions adéquates et volontaires, éveiller des réactions et orienter des décisions[59]. Les automatismes passifs constituent, entre la machine et son opérateur, à la fois *un lien qui engage vers l'action, et une frontière à franchir pour la réaliser*.

*Les *automatismes actifs* : Ils sont plus complets et (souvent) de plus haut niveau, effectuent automatiquement des tâches dont les automatismes passifs suggèrent seulement l'exécution, (manuelle). Exemples : PA, A/THR [60] et FADEC[61].

Dans la chaîne de composants d'un automatisme actif, figurent souvent en partie amont des automatismes passifs qui permettent à l'opérateur humain d'interpréter des données d'entrée prétraitées[62]. Elles sont gérées plus en aval par un système asservi dont la servocommande constitue la partie active proprement dite.

Nb 1 : La nature passive ou active d'un automatisme n'implique pas forcément que la conception du système *global* qui utilise ensemble homme et machine soit orientée plutôt vers l'Homme, ou plutôt vers la machine (« human » ou « machine » centered design). Ce point est brièvement commenté dans l'**Annexe 4**.

Nb 2* : L'avion et son pilote sont en relation avec les services d'assistance et de contrôle au sol (Navigation aérienne et CCO), et sont immergés dans un environnement aérien, (météo …). Pour un automatisme passif ou actif, on précise dans l'Annexe 5** la nature (information ou-et action) et l'orientation des flux (relations vectorielles) entre ces divers intervenants.

Nb 3* : Les composants principaux d'un automatisme actif (système asservi) sont présentés en **Annexe 6, la partie amont passive y est figurée en relation avec l'IHM[63]

Synthèse

Dans les sous-chapitres précédents, on a voulu d'abord traduire l*'intention* d'augmenter l'automatisation dans le transport aérien, et on a abordé ensuite la *description* des équipements, considérés ainsi sous les deux aspects qui concernent respectivement leur raison d'être et leur nature.

---

[57] et surtout éviter qu'une seule information, en provenance d'un capteur unique, puisse devenir erronée et entrainer une réaction inadéquate, voire dangereuse, du pilote ou de l'automatisme lui-même s'il est connecté à cette information.
[58] ECAM : Electronic Centralized Aircraft Monitoring.
[59] Les visualisations modifiables sur écrans ou en vision tête haute, les alertes audio à voix artificielles, les commandes sensitives, les vibrations de sièges, et maints objets connectés figurent parmi les moyens « passifs » disponibles ou expérimentaux issus du traitement automatique de données primaires.
[60] A/THR : Auto Throttle (automanette).
[61] FADEC : Full Authority Engine Control.
[62] Il importe qu'un pilote dispose de telles informations (passives) pour vérifier, par exemple, si les actions du PA sur les commandes de vol sont correctes.
[63] IHM Interface Homme-Machine.

Partant de la nécessité d'améliorer la sécurité en diminuant les taux d'accidents compte tenu de la croissance du trafic, on a considéré que le développement récent des techniques numériques offre une *opportunité de ruptures* ou de progrès qualitatifs dans l'automatisation et les communications, en vue de favoriser la gestion des mouvements d'avions et de diminuer les risques d'erreurs humaines. Les automatismes sont toutefois limités : performants tant qu'il s'agit de logique et de rapidité, mais encore inférieurs à l'humain en « intelligence ».

Les causes humaines intervenant dans la plupart des accidents, on pourrait être incité à envisager des avions autonomes sans pilotes. Cette solution radicale ne semble pas réaliste avant 2050 pour le transport de passagers, et on se bornera à ne traiter que d'avions pilotés, dans *la continuité de l'évolution historique de leur avionique*.

Avant d'aborder le prochain chapitre, et à titre préliminaire, on s'est proposé de tirer enseignement de quelques caractéristiques marquantes à caractère intemporel. C'est le cas des relations étroites entre les pilotes et leurs avions, et d'aspects particuliers de l'avionique inchangés au cours du temps : spécificités aéronautiques, et classement des automatismes suivant leur appartenance, leur niveau et leur fonction active ou passive.

Chapitre 2 : La REVOLUTION NUMERIQUE en AVIONIQUE

En développant les notions générales introduites dans le Chapitre 1, on va traiter des progrès qui ont jalonné l'Histoire de l'Aéronautique à la suite de son enrichissement progressif en automatismes *à partir des années 1970* : on citera brièvement leurs utilisations et leurs configurations, présentées plus concrètement dans l'**Annexe 7**. On constatera que les introductions d'équipements nouveaux ont été imposées par la *chronologie* des innovations techniques, plus que par une *logique globale* d'amélioration des aéronefs et de leur conduite. On sera ainsi amené à reconnaître que, *par couches successives*, l'avionique s'est peu à peu cristallisée dans sa forme actuelle ; la révolution informatique risque de remettre ce processus en cause dans les prochaines décennies.

Eléments historiques

Jusqu'aux années 80

Les premières phases d'automatisation ont déjà été évoquées dans le chapitre 1, elles traitaient d'avions dont la plupart sont obsolètes. On va maintenant considérer l'équipement d'appareils dont certains sont encore en service, depuis les années 70 qui sont des années charnières au cours desquelles les techniques numériques ont commencé à s'imposer.

**Accumulation des équipements* : L'évolution chronologique qui a précédé les années 70 est caractérisée par la juxtaposition d'indicateurs d'affichage séparés, indépendants les uns des autres, *chacun spécifique d'une seule fonction*. Ils ont été installés au fur et à mesure de l'avancement des techniques, en couches successives, parfois sous la pression de besoins révélés par des accidents, sans projet sérieux de globalisation ni d'interconnexion entre gestion du pilotage, de la navigation, et du système avion (moteurs, carburant, cabine).

**Débuts du Numérique* : Les années 70 inaugurent la naissance des *microcalculateurs numériques*. L'avionique joue désormais un rôle primordial, les TIC (Techniques de l'Information et des Communications) viennent en transformer la nature en profondeur. Les commandes de vol et de moteurs commencent à être régies par calculateurs digitaux, (entrées d'air du Concorde), de même que la gestion des paramètres aérodynamiques, de la géolocalisation inertielle, et de la programmation des PA. Les claviers et les écrans multifonctions (cathodiques) s'installent à bord. C'est l'apparition des

automatismes de haut niveau, dont les dysfonctionnements deviennent difficiles à comprendre et à maîtriser.

Depuis les années 80

**Informatisation et glass cockpits* : La « charge » avionique arrivait à saturation dans les cockpits, lorsque le développement technologique a changé de nature sous l'effet des conquêtes de l'Informatique. Le rythme rapide des innovations a imposé aux avionneurs des efforts conséquents d'adaptation, compte tenu du délai entre la conception d'un projet d'avion et sa mise en service. Les cellules deviennent désormais compatibles avec des « mises à jour » importantes et fréquentes de leurs équipements[64], l'informatisation permet de réaliser par voie logicielle des associations en sous-ensembles gérés par calculateurs, une intégration de plusieurs données primaires émanant d'équipements basiques s'effectue *sans liaison physique autre que filaire entre les divers appareillages mis en réseau*.

Cette *interconnexion des éléments de base à fonction unique dans un système multifonctionnel* est une rupture innovante qui ouvre la voie à une synthèse visuelle et conceptuelle des informations. Ce changement devenait indispensable, il a été réalisé progressivement dans les *glass cockpits*[65]. Mais leur sobriété spectaculaire n'a été obtenue qu'au prix d'une compacité accrue d'informations, devenues trop nombreuses sur les écrans pour être interprétables d'un coup d'œil : c'est le développement systématique des *automatismes passifs synthétiseurs de données,* devenant l'objet d'études ergonomiques approfondies. On commence à faire appel aux physiologistes, psychologues, et cogniticiens, qui doivent aussi tenir compte de la présence et du comportement de *deux pilotes* à bord.

**Apports d'une super-automatisation* : Les progrès dans l'automatisation et les communications à bord s'orientent aussi vers une super-automatisation appliquée aux matériels eux-mêmes qui deviennent « *intelligents* » et gagnent en *résilience* : des résultats intéressants sont obtenus avec les automatismes de nouvelle génération qui commencent à résoudre par eux même leurs propres anomalies. En particulier, c'est le cas avec l'ECAM qui offre une aide logicielle à la détection et au diagnostic de dysfonctionnements, et présente des solutions envisageables pour résoudre une grande variété de problèmes, en laissant à l'opérateur la part de décision que le calculateur ne saurait prendre seul.

**Les nouveaux pilotes* : Comme on l'a déjà signalé, le pilotage manuel ne représente plus qu'une fraction très réduite du temps passé à bord[66], le vol étant sous gestion quasi-permanente du PA. Le temps des pilotes en croisière est consacré essentiellement à veiller au *respect des procédures*[67], au *monitoring*, et à l'*anticipation*, surtout en cas d'imprévu, de déroutement imposé, ou de météo difficile.

En l'absence d'incident, les compétences traditionnelles des pilotes n'ont à s'imposer que pendant quelques instants d'importance cruciale (décollage et montée initiale, approche finale et atterrissage). On s'efforce donc d'adapter prioritairement les cockpits aux situations d'urgences soudaines et inattendues. Il ne s'agit pas seulement d'améliorer l'ergonomie, mais de repenser à la base la conception de la conduite des vols *de manière à la rendre plus efficace dans les phases délicates, et dans les circonstances exceptionnelles* que tout pilote est amené à rencontrer dans sa carrière. Face à cette exigence, la diversité, la complexité, et le rythme accéléré des innovations technologiques depuis les

[64] dont la part logicielle en croissance est généralement modifiable sans grandes difficultés, ce qui n'était pas le cas avec les calculateurs analogiques.
[65] à écrans plats lcd reconfigurables numériquement (à partir des années 80).
[66] de l'ordre de 4h/an pour les longs courriers, (ou 10h/an suivant les sources).
[67] L'Organisation de l'Aéronautique civile internationale (OACI fondée en 1944 par la Convention de Chicago), et les autres Institutions internationales se sont peu à peu alourdies en même temps que les flottes s'augmentaient, Les règlementations et les procédures se sont rigidifiées, les certifications sont devenues plus sévères et leur obtention moins rapide. Les exigences de la Sécurité requièrent une grande prudence avant la certification d'équipements vitaux, de la part de décideurs qui ont à gérer un Système de transport aérien considérable, utilisant des technologies complexes, et à taux de croissance élevée (doublement en quinze ans).

années 80 ne permettent plus de les appliquer directement sans souci approfondi d'*intégration* et de *cohérence* : il ne suffit pas tellement « d'en faire plus », mais de faire « mieux ».

Tendances résultant des évolutions historiques

Hiérarchiser les informations et les rendre motivantes pour des actions manuelles adéquates semble être une voie prometteuse pour des améliorations. Dans ce but, on doit :

- n'offrir au pilote, en orientant ses décisions, que les informations réellement utiles, au moment où elles s'avèrent nécessaires : *automatismes passifs « intelligents »*,

- éviter que des interventions inopérantes ou nuisibles, avec des effets cumulatifs conduisant à une *falaise*[68], puissent se renouveler en cas d'incompréhension d'une situation critique inattendue et brutale : automatismes toujours compatibles entre eux, avions toujours « pilotables » sans perte de contrôle possible,

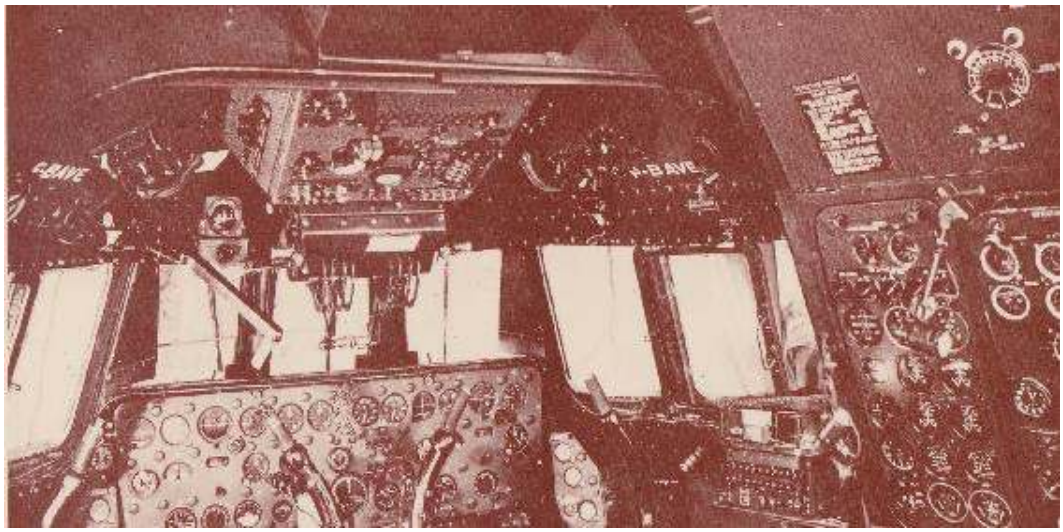
- ne pas chercher à perfectionner les systèmes existants en leur ajoutant des couches complémentaires qui les compliquent, *effets millefeuilles,* mais au contraire simplifier l'utilisation en intégrant les sous-systèmes de manière plus cohérente.

Quelques réalisations allant dans ce sens sont présentées dans l'**Annexe 7**.

Comment (di)gérer le millefeuille

Réduction de l'équipage

Jusqu'aux années 70, les appareillages de bord des avions de ligne avaient envahi les cockpits, avec des centaines de cadrans et de boutons nécessitant quatre ou cinq membres d'équipage, chacun doté d'une panoplie d'équipements particuliers, particulièrement volumineux pour le *mécanicien* (chargé de la gestion du système avion), et pour le *radionavigateur* (chargé des communications et de la géolocalisation).



SE 2010 Armagnac
Une quarantaine de cadrans immédiatement sous les yeux des pilotes ….

L'abandon de la radiotélégraphie Morse au profit de la phonie dans les années 30 et l'allègement des équipements grâce aux transistors dans les années 50, ont autorisé la disparition de l'opérateur radio et de son pupitre, l'équipage initialement à 5 (radio *et* navigateur, mécanicien et deux pilotes) se réduisant

[68] Rappel de la note 14.

ainsi à 4. Ainsi, avec l'installation de terminaux radioélectriques ergonomiques, les pilotes et le navigateur ont pu devenir gestionnaires des communications[69]. On supprima le navigateur plus tardivement (dernières licences délivrées à la fin des années 70) grâce à l'extension des moyens de radio-navigation automatiques et grâce aux centrales à inerties.

Concorde
Peu avant les « glass cockpits »

Dans les années 80, les automatismes simplifiant le contrôle des réacteurs[70] ont permis de supprimer le tableau de bord individualisé du *mécanicien* désormais placé face vers l'avant (Forward Facing Crew cockpit chez Airbus). Assis entre les pilotes[71] et derrière eux, devenu « ingénieur de vol », il gérait motorisation, train, volets, carburant, climatisation …, à portée des commandes et des indicateurs placés devant lui et au plafond. L'intégration de multiples sous-systèmes a finalement justifié sa disparition, (sur DC9, puis sur Boeing 767 et Airbus A310 à Glass Cockpit cathodique).

Ainsi, la réduction progressive de l'équipage de 5 à 2 a donné aux seuls pilotes des *charges nouvelles de communication, navigation et gestion système*. Cette accumulation de fonctions devenait incompatible avec la présence d'indicateurs trop nombreux pour que reste praticable la gestion simultanée de paramètres trop divers. Les instruments de bord ont donc commencé à devenir *multifonctions*, munis de diverses consignes d'affichage et de choix de modes. Mais leur fonctionnement *analogique* ne se prêtait guère à une concentration et à une présentation modifiables[72]. L'avionique numérique s'attache depuis une trentaine d'année à résoudre ces problèmes.

Intégration d'informations et d'automatismes multifonctionnels

Les affichages sur écrans (d'abord cathodiques) sont devenus facilement commutables, plus visibles, et multifonctionnels. Mais on en est vite arrivé à les surcharger malgré des efforts constants en ergonomie, car les indications gardaient leur signification primaire, *sans présentation synthétique suffisante aidant*

[69] Notons que l'accroissement du trafic et la complexification du contrôle aérien font maintenant de cette tâche presque un plein temps pour le PNF, (Pilot Not Flying), appelé aussi PM, (Pilot Monitoring).
[70] Ayant abouti par étapes aux FADEC d'aujourd'hui.
[71] Disposition toujours présente sur les grands avions, à l'intention d'un opérateur complémentaire occasionnel (ou d'un instructeur).
[72] Il faut garder à l'esprit que dans un cockpit pour équipage à 2 pilotes, l'incapacité définitive de n'importe lequel des deux est envisagée ; celui qui reste doit être capable de finir le vol seul, d'assumer seul toute la charge de travail et d'accéder à tous les manipulateurs nécessaires, d'où une conception particulière de la planche de bord, opérationnelle face à chacun des deux sièges, mais sans excès de redondance.

à leur compréhension intuitive et instantanée : le millefeuille se réduisait en taille mais pas en nombre de feuillets.

**Intégration des sous-ensembles* : Les microcalculateurs se sont imposés alors pour la gestion logicielle de *groupes* d'instruments, ils ont été organisés et *intégrés* en réseaux (protocoles Ethernet et analogues), on en est venu à traiter numériquement les structures avioniques principales en un nombre réduit de blocs : FADEC pour la propulsion, « fly by wire » pour les commandes électriques de vol, PA multimodes programmables, FMS d'intégration de plan de vol sur la console centrale MCDU (Multiple Functions Display Unit) …. sous-ensembles dont on précisera plus loin la structure dans un *panorama des équipements* (sous-chapitre suivant). Cette solution a permis de rassembler et compacter les informations, de les rendre perfectibles par voie logicielle, et d'*élargir le domaine d'automatismes passifs* avec un degré élevé de présentation synthétique grâce aux écrans PFD et MFD-ND.

Pilotage traditionnel ou par objectif* : Notons que l'instrument de pilotage principal, le PFD, est toujours représentatif des indications d'*attitude* (assiette et inclinaison, au centre*)*, vitesse (à gauche), altitude-vario (à droite), et cap (en bas), qui sont les fondamentaux du vol à vue VFR, **alors que c'est l'indication d'*incidence*, donnée *aérodynamique* généralement absente au tableau de bord, qui définirait la situation de *sécurité* optimale de l'avion dans la partie basse vitesse de son domaine de vol, (intermédiaire entre décrochage et finesse maximum). L'indication d'assiette (pente + incidence) peut être trompeuse si la vitesse est mal contrôlée : l'intérêt de continuer à piloter ainsi traditionnellement « par rapport à l'horizon »[73] est à discuter en comparaison de ce que serait un « pilotage par objectif » *imposant la pente*, (l'automatisme réglant alors l'optimum d'incidence-vitesse avec une connaissance permanente et sécuritaire de l'incidence).

Gestion de vol centralisée, pilotage coopératif

**PA actif en permanence* : L'augmentation de puissance des calculateurs a permis de franchir une étape supplémentaire dans les avions récents : l'avionique tend à être gérée par un seul « cerveau » qui a pour mission (idéale) de contrôler l'ensemble des fonctions et de détecter en temps réel les écarts au fonctionnement optimal, en proposant au pilote, ou en effectuant automatiquement, les actions les plus adéquates pour résoudre les problèmes.

L'un d'entre eux, fondamental, concerne *l'interconnexion entre PA et commandes de vol manuelles. Avant l'avènement des commandes de vol électriques*, les PA possédaient un *mode de surpassement manuel* par le pilote, lui permettant de suppléer aux manques ressentis de performances du PA en « ajoutant » ses propres entrées sans pour autant faire déconnecter le PA. Ce mode, quand il était utilisé de façon prolongée, a conduit cependant à des situations génératrices d'accidents lorsque l'Homme et l'automatisme poursuivaient des objectifs différents. Depuis l'avènement des commandes de vol électriques, il n'est plus utilisé, au moins sur les Airbus. Toutefois les logiques du PA restaient insuffisamment adaptées lorsque l'avion n'était plus dans son domaine de vol normal (par exemple en mode maintien d'altitude à l'approche du décrochage). Pour y remédier, l'interconnexion entre PA et commandes de vol a détecté la sortie imminente du domaine de vol et a déconnecté automatiquement le PA. Cette transition de type « tout ou rien », qui est un élément de sécurité du vol largement déployé dans les architectures des avions actuels, a été significativement améliorée sur l'A350 grâce à l'intégration poussée matérielle et logicielle des fonctions PA et pilotage manuel : *en cas de sortie imminente du domaine de vol, le PA reste désormais actif et engagé, et bénéficie dans ses modes et logiques des protections d'enveloppe de vol du mode pilotage manuel*. Le pilote peut toujours reprendre

[73] C'est ce que réalise l'horizon artificiel, indiquant directement l'attitude longitudinale (assiette) et latérale (inclinaison) de l'avion par rapport au sol.

L'indication de *pente de la trajectoire* nécessite une *géolocalisation* (verticale) instantanée, précise et continue, elle n'indique qu'*en air calme* la direction du vent relatif par rapport au sol.

L'incidence est une donnée purement aérodynamique, c'est l'angle de l'avion et du vent relatif, elle varie constamment dans les turbulences.

Restituer l'assiette à partir de mesures de pente *et* d'incidence nécessiterait donc la combinaison de deux appareils très différents, résultat obtenu beaucoup plus simplement par le gyroscope de l'horizon artificiel.

en main en déconnectant volontairement le PA, mais s'il ne le fait pas, c'est le PA lui-même qui évitera la sortie du domaine de vol au-delà des valeurs limites.

Parallèlement, dans les données primaires redondantes, l'automatisme choisit de ne pas afficher une donnée erronée : la donnée affichée (correcte) est celle utilisée par le PA. De ce fait, la compréhension des dysfonctionnements par le pilote est facilitée, et plus sûre si les capteurs redondants sont *triplés, commutables, et de technologies différentes*.

**Pilotage coopératif* : On s'oriente ainsi vers des formes nouvelles d'assistance au pilotage, qui devient *coopératif*. L'homme n'intervient qu'en *complément*, tout en restant actif en cas de dépassement des compétences de l'automatisme, et voit ainsi réduire progressivement son rôle à des interventions qui deviendront d'autant plus rares que les performances de l'automatisation s'élargiront. Il ne s'agit plus du remplacement d'un automatisme insuffisant par le pilote, mais d'une *association* où les deux intervenants agissent ensemble en cumulant leurs compétences respectives et en s'interdisant mutuellement les manœuvres non adéquates. Ce programme d'« intelligence partagée » entre un opérateur et un automate est un sujet d'actualité majeur pour les spécialises de l'IA et les cogniticiens.

**Automatismes passifs intelligents* : Un autre type d'interconnexion concerne l'affichage dans les automatismes passifs. La gestion centralisée permet déjà de jauger la pertinence d'un ensemble de données, suivant les phases du vol et les occurrences d'anomalies, et de déclencher éventuellement des alarmes. En allant plus loin, donner aux automatisme*s passifs* une fonction intelligente *motivant, définissant, et autorisant ou interdisant l'action du pilote,* les fait évoluer vers une structure d'*hybridation* avec les automatismes actifs, tout en permettant à l'opérateur de conserver une part d'initiative (que l'automatisme devra contrôler toujours positive ou neutre, mais jamais néfaste). L'affichage peut alors s'alléger sur les écrans en devenant plus significatif, resserrant la *cohérence* entre les données, et la *coopération* homme-machine. L'intelligence apportée à la machine coopère avec celle du pilote pour que les données affichées soient épurées et *rapprochées du stade décisionnel*. Par exemple, la perception de certaines données complexes, telles que la figuration du sol, s'obtient et s'améliore grâce à divers dispositifs de vision augmentée en cours de développement (EVS, Enhanced Vision System) : de nuit comme de jour, en présence de nuages ou de brouillard, le pilote « voit » le sol, la mer, le relief et la piste.

**Hybridation* : L'hybridation passif-actif est réalisable et perfectible non seulement par des compléments d'équipements de l'avion, elle l'est aussi par des *prothèses* de son pilote : dans les deux cas, réduite quantitativement, l'initiative humaine n'entrera en jeu que pour les décisions de très haut niveau, celles qui vont au-delà des possibilités offertes par l'IA.

Bien que différentes dans leur support, homme ou machine, les notions *d'humain augmenté* par prothèse et de *copilote électronique* intégré au matériel de bord relèvent de la même tendance : ne pas se contenter d'aider à la présentation d'informations pertinentes[74], mais prévenir les amorces, et même les simples intentions, d'interventions humaines inadaptées. C'est demander beaucoup à l'intelligence artificielle à travers une gestion centralisée déjà complexe, mais parvenir à un résultat probant réduirait considérablement la charge de travail des pilotes.

Intentions futuristes* : Grâce à la gestion logicielle centralisée, hybridation, prothèse, coopération, et copilote électronique valorisent *en qualité* le rôle du pilote tout en diminuant la fréquence de ses actions. Le copilote électronique est de son côté une étape justifiant le SPO (mono-pilote) et orientant peut-être vers l'avion zéro-pilote. Le **livret 8 évoquera des recherches menées dans ce sens, mais on est encore loin de remplacer un pilote par un robot dans le cockpit, ou, mieux encore (?) d'introduire les compétences du robot dans l'ordinateur de bord, en supprimant le cockpit, ses boutons

[74] ce qui se fait déjà en donnant satisfaction pour des situations à évolution lente mais pose problème pour une perception correcte en cas de situations à modifications rapides. On est victime de la standardisation des présentations du PFD, basée sur le T basique, (Jean Pinet).

et ses écrans[75], (ce que l'on commence à envisager pour certains véhicules terrestres dont on supprimera le volant et les pédales).

L'Annexe 7 donne quelques exemples complémentaires d'automatismes utilisés dans les avions récents.

Risques d'incompatibilité des automatismes actuels, Exemples

Gérer pilotage et navigation par logiciels confère au PA un grand nombre de fonctions simultanément actives, et de modes dont tous les cas de dysfonctionnement ne peuvent pas toujours être détectés et corrigés automatiquement. L'*enchainement* de ces modes suit une logique complexe que l'équipage peut avoir difficulté à comprendre et anticiper dans les situations inusuelles, malgré l'affichage de ces modes sur la partie FMA (Flight Mode Annunciator) du PFD. Un non dégagement ou engagement de PA en attitude anormale peut conduire à des réactions dangereuses si le PA se trouve au-delà de ses limites de fonctionnement. Des améliorations sont en cours sur les avions très récents.

Le système PA intègre d'autres blocs d'automatismes, en particulier auto-manette, atterrissage automatique (autoland, guidage sur faisceau ILS), directeur de vol (FD), sélection des sources d'informations anémométriques et inertielles … qui peuvent avoir leurs propres pannes intempestives, et avec lesquels la programmation de PA peut entrer en conflit.

- Ainsi, dans l'accident China Airlines à Nagoya en 1994, une remise des gaz a été commandée intempestivement par l'équipage en fin d'approche terminale ILS avec PA engagé. Le PA resté engagé a suivi sa logique : pleine poussée et mise en palier puis en montée pour rejoindre l'altitude présélectionnée de consigne après remise des gaz. L'équipage a suivi au contraire sa propre logique de poursuite de l'atterrissage en réduisant manuellement les gaz et en poussant sur le manche. Sur A300, cette opération ne désengageait pas automatiquement le PA qui, dans sa logique de remise des gaz, avait commandé à la fois la gouverne de profondeur à cabrer et le Plan Horizontal Réglable (PHR) à cabrer. L'équipage qui avait le dessus sur le PA a commandé la gouverne de profondeur à piquer pour continuer la descente sur le plan de l'ILS. Il en a résulté une situation de « hors trim » allant jusqu'au PHR en butée à cabrer et profondeur en butée à piquer. Cette situation, toujours équilibrée et contrôlable lorsque l'avion descend avec faible poussée, devient incontrôlable lorsque la pleine poussée vient d'être appliquée. En effet, l'application de la pleine poussée provoque un fort couple à cabrer sur tout avion avec moteurs sous voilure. Le PA a finalement été déconnecté (tardivement) par l'équipage, mais l'avion était parti dans un cabré incontrôlable suivi d'un décrochage non récupérable à basse altitude. L'intervention intempestive de l'équipage sur le PA sans le faire déconnecter apparaît ainsi comme une source d'accident, défaut corrigé sur les avions récents.

- En finale en atterrissage automatique, un dysfonctionnement de sonde radio-altimétrique peut déclencher un arrondi et une mise au ralenti prématurée, d'où mise en palier avec réduction de vitesse et situation critique de manque d'énergie près du sol.

- La concentration des informations dans l'EFIS, et particulièrement sur PFD et MFD, défavorise une vision et une conceptualisation d'ensemble lorsque la charge de pilotage devient intense. C'est alors que la sélection d'un mode PA non adéquat et sa non perception par l'équipage sur le FMA[76] peuvent avoir de lourdes conséquences, (par exemple erreur sur un taux de descente).

Difficultés dans la résolution des problèmes

Compliquer un système par plus d'automatisation risque de créer par ses nouvelles composantes un accroissement des cas d'incompatibilités *potentielles* : dans les 4 modes principaux des PA (vertical, latéral, commun, poussée), une quarantaine de configurations d'actions particulières sont disponibles sur les avions récents, activées automatiquement et plus ou moins *transparentes* pour le pilote. Dans ces

[75] Attention : on ne sait toujours pas quantifier les interventions positives humaines de récupération de situations potentiellement dangereuses, nombreuses et banales dans la vie opérationnelle actuelle, donc prévoir ce que l'entièrement automatique DEVRAIT faire (Jean Pinet).

[76] d'où nécessité procédurale d'inclure le FMA dans le circuit visuel et d'en annoncer les modes.

conditions, une déficience d'un capteur, d'une servocommande, ou d'un indicateur, est difficilement identifiable et réparable *en temps limité*. Plusieurs voies de recherche sont d'actualité pour résoudre ce problème :

- rendre les automatismes existants (redondants) plus intelligents, plus cohérents, inter-communicants et autoréparables est une des démarches préférentielles, mais non systématiques, pour améliorer la *résilience*, (capacité de fonctionner en cas de panne),

- la *concurrence* entre l'humain et les *systèmes experts* joue lorsqu'il s'agit de concevoir de nouveaux équipements, mais on songe aussi à établir une *coopération* directe entre Homme et machine au niveau cognitif : c'est là où les *prothèses connectées* de l'avenir pourront peut-être intervenir sur les perceptions et les pensées, en *collaboration* intégrée avec les ordinateurs.

- la *mise en sauvegarde* temporaire constitue un compromis, en offrant un délai de décision et d'action permettant au pilote de réfléchir, consulter ses documents de bord, effectuer des tests, et contacter des services d'assistance au sol. Toutefois, l'exécution d'une mise en sauvegarde automatisée n'est pas absente de risque pour sortir d'une situation dangereuse, si cette situation est conséquence d'un dysfonctionnement *en cours d'aggravation rapide* (falaise) concernant une commande de vol, un capteur, ou une panne de propulsion à laquelle une intervention humaine pourrait peut-être remédier.

Mais revenons à la situation d'aujourd'hui pour la décrire avec plus de précision dans le sous-chapitre suivant, où l'on va se rapprocher davantage du concret en faisant apparaître la panoplie des équipements principaux, avec mention de leurs interconnexions.

Panorama des équipements actuels

Automatismes de conduite du vol

Dans un avion moderne, un grand nombre d'automatismes sont présents et interconnectés, chacun avec des modes de fonctionnement souvent multiples, définis par l'équipage, par les services au sol, ou par les composants de l'avion eux-mêmes (en particulier par les calculateurs de bord).

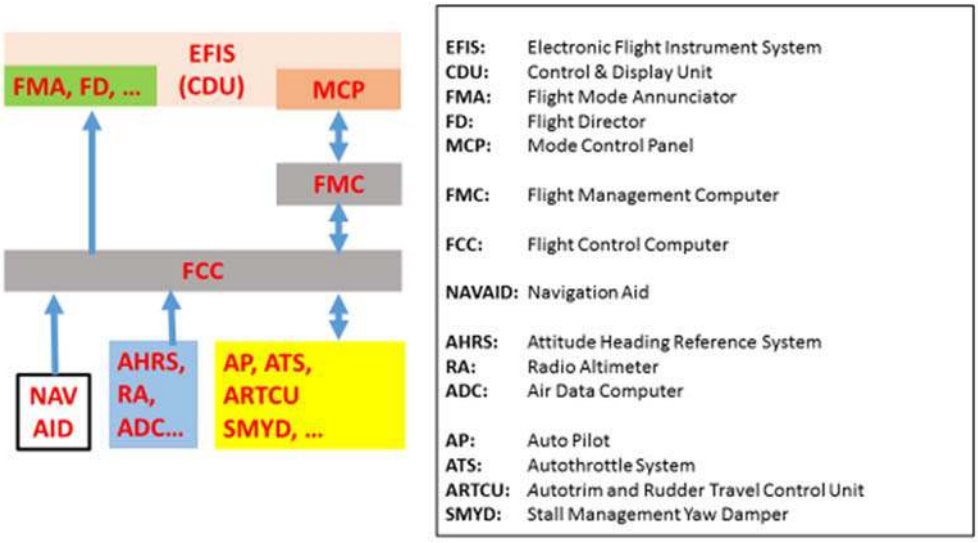
Les automatismes de pilotage ne font jusqu'à présent appel qu'à des équipements embarqués : capteurs aérodynamiques (Pitot et sondes clinométriques), capteurs d'attitude (gyroscopiques) et de mouvements (accéléromètres), ….

Pour la navigation, hormis les centrales à inertie qui sont autonomes (mais connectées à divers systèmes de bord), la plupart des automatismes de guidage et d'anticollision sont des appareillages radioélectriques tributaires d'émetteurs au sol, de satellites, ou d'avions voisins. Certains instruments sont seulement récepteurs (ADF, VOR, ILS …), d'autres, de type transpondeur, nécessitent *une fonction d'émission à bord* (DME, TCAS …). La surveillance d'environnement s'effectue à partir de radars de bord (météo et proximité d'obstacles). Notons aussi les messages automatisés vers les services au sol (ACARS …), ou provenant d'eux.

La figure ci-dessous [77] synthétise l'ensemble des automatismes principaux, *connectés à un ordinateur central* (FCC). Ce schéma est très simplifié, en réalité la structure de calcul se trouve répartie entre plusieurs calculateurs redondants travaillant avec un niveau élevé de parallélisme.

Dans un avion à commandes de vol électriques, il convient d'ajouter en entrée de FCC les ordres venant des organes de pilotage, et en sortie ceux qui vont vers les servocommandes des gouvernes.

[77] inspirée d'un schéma de VAT France.



Fonctions automatiques à bord pour la conduite d'un vol

*A*utomatismes actifs* : Ils sont groupés dans le bloc jaune.

Ils sont en principe déconnectables et liés au PA multimodes par le calculateur central FCC. L'automanette ATS est liée aussi à l'automatisme FADEC de gestion des moteurs, *non figuré sur le schéma* en raison de son autonomie fonctionnelle[78].

Autotrim, Rudder Travel Control, Stall Management et Yaw Damper peuvent constituer des unités séparées suivant les architectures retenues.

*O*rganes de détection* : Ils sont groupés dans le bloc bleu.

L'Attitude-Heading Reference System (AHRS) regroupe un ensemble de détecteurs d'attitude et de position géographique, dont centrales inertielles avec leurs calculateurs associés (liées au GPS et aux autres systèmes de géolocalisation).

L'Air Data Computer (ADC) fournit altitude, pression, température extérieure, CAS, Mach, TAS et tendances. Le radioaltimètre RA fournit la hauteur au-dessus du sol (2 gammes, max 10000ft).

**Automatismes passifs* : Le bloc vert représente des *automatismes passifs*.

- Le Flight Mode Annunciator (FMA) présente principalement les visualisations de modes du PA (AP) et de l'automanette (ATS), il prévient l'équipage de leur état (armé, engagé) et de leurs changements d'état éventuellement imposés par le FMC. L'interface est composée généralement de lettres et de chiffres, acronymes dont les changements de couleur et d'aspect éveillent l'attention de l'équipage en fonction du degré d'urgence des interventions souhaitables. Ces indicateurs sont souvent intégrés en partie haute des PFD et MFD.

- L'interface du directeur de vol, (FD, Flight Director), est un symbole mobile (barres de tendance, ou moustaches sur avions légers) au centre de l'horizon artificiel du PFD. En suivant les barres de tendance, le pilote réalise en manuel ce que ferait le PA s'il était engagé, dans les modes qu'il activerait : le FD « instrumentalise » le pilote en lui réservant sa part gestuelle, mais en l'aidant de l'anticipation et de la précision que procurent les lois de contrôle du PA.

**Calculateurs* : Le FMC (Flight Management Computer) est le *calculateur enregistreur* de plan de vol, de données cartographiques, aéroportuaires, radiobalises, points de repère des routes aériennes (Waypoints), ainsi que des données avion. Il est chargé avant le départ. En liaison avec le calculateur

[78] Le FADEC gère les systèmes propulsifs et leur alimentation en carburant avec ses propres calculateurs qui reçoivent du FCC des données prétraitées (provenant en particulier de l'ADC, de l'ATS et du MCP).

principal FCC, et avec le panneau de commandes MCP pour les modifications de programmation lors du vol, il calcule et génère les données de visualisation d'un plan de vol horizontal et vertical (dont optimisation de l'altitude et de la vitesse de croisière).

Après le décollage, le FMC *engage automatiquement* les modes successifs du PA, et règle tous les paramètres du pilotage par le PA, ainsi que la gestion des moteurs par le FADEC.

L*e FCC (Flight Control Computer), calculateur principal, gère l'ensemble des sous-systèmes de conduite du vol,* d'après les *choix de mode définis par l'équipage au moyen du MCP* (Mode Control Panel).

**Panneau des commandes de vol* : Le MCP, (Mode Control Panel), est le *panneau de commande* du PA et des automatismes annexes de conduite du vol (AFCS). Il est situé très en vue sous l'auvent au centre du tableau de bord. Le MCP condense *l'ensemble des boutons de manœuvre des automatismes de pilotage principaux*, concernant essentiellement les modes du PA : vitesse, cap, altitude, pente, taux de virage, engagement d'automanette, suivi de faisceau ILS. Le PA opère alors en mode « sélecté ». Le PA peut aussi prendre ses ordres directement du FMC, il opère alors en mode « managé ».

**Instruments de navigation et communication intégrés* : Le bloc NAVAID lié au FCC condense la NAV, et intègre l'ensemble des aides radioélectriques à la navigation, plus ou moins interconnectées, et tributaires de diverses installations au sol et de satellites. Les plus classiques :

- ADF (Automatic Direction Finder) radiocompas MF-HF, orientant vers une balise NDB,

- VOR (VHF Omnidirectional Range) - DME (Distance Measurement Equipment), permettant de situer l'avion angulairement par rapport à une radiale émanant d'une balise, et en distance par rapport à elle.

- ILS (Instrument Landing System), avec radiobalises pour approche/atterrissage, LOC (Localizer) faisceau dans l'axe de la piste, G/S (Glide Slope) plan de descente conduisant au point théorique de toucher des roues sur la piste. Suivant sa qualité et sa redondance, l'ILS autorise les différentes catégories d'atterrissage tout temps.

- GNSS (Global Navigation Satellite System), dont GPS.

- XPDR (Transponder) pour identification par radar secondaire.

- TCAS (Traffic Collision Avoiding System) transpondeur entre avions équipés, calculateur de menaces de collision et si besoin élaboration, concertée entre deux avions, de la trajectoire d'évitement.

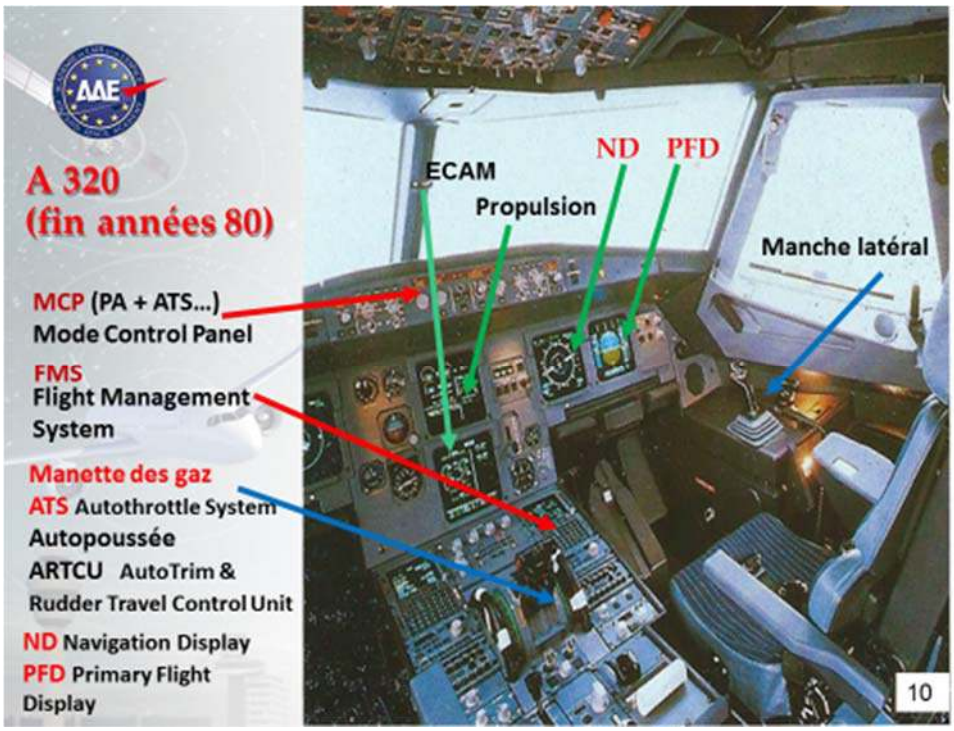
- COM : Communications VHF-UHF air-sol, air-air, et avec satellites, messages ACARS (Aircraft Communication Addressing and Reporting System) vers CCO...

Interfaces d'un glass cockpit

Les progrès dans la gestion des vols ayant permis de réduire l'équipage à deux pilotes (en appliquant le concept « Forward-Facing Crew Cockpit » (FFCC), le poste de pilotage est en évolution constante mais respecte désormais les standards de « glass cockpit ». L'amélioration d'ergonomie est fondamentale car il faut avoir à la fois « les yeux dehors, et dans les instruments », ce que l'on tente d'obtenir au moyen de HUD (Head Up Display, ex : A400M), « prothèse » d'affichage tête haute.

Les instruments analogiques primitivement individualisés pour chaque fonction[79] sont remplacés par les écrans plats à affichages multiples (initialement écrans cathodiques), concentrant de nombreuses informations modifiables et programmables dans un champ de vision réduit. L'amélioration d'ergonomie accompagne la mise en valeur des données les plus importantes adaptées à chaque phase du vol. On tente d'en donner une idée correspondant à la situation actuelle des PFD et MFD-ND dans l'**Annexe 8**.

[79] les 6 principaux cadrans étaient traditionnellement disposés en T : en haut anémomètre, horizon, altimètre, au-dessous au centre gyro directionnel (ADF), complétés de part et d'autre par l'indicateur de virage à gauche, et le variomètre à droite.



Cockpit de A320

**Conduite du vol automatisée* : En utilisant toutes les ressources de son FMS (Flight Management System), un équipage peut, en théorie, conduire un vol uniquement à partir de données logicielles et en n'effectuant que des gestes d'informaticien. Mais la déconnexion ou le changement de mode volontaire des multiples automatismes programmés impose en pratique de revenir par intermittences au pilotage manuel. Pour le réaliser en « fly by wire », les pilotes ont désormais à leur disposition un mini manche latéral, et cette *commande électrique* fait beaucoup plus que correspondre seulement à un mouvement proportionnel des gouvernes : entre le mini manche et les servomoteurs de gouvernes s'interposent des asservissements dont les calculateurs traitent numériquement les *paramètres aérodynamiques* de l'avion (équations de la Mécanique du vol) pour optimiser et faciliter le pilotage.

Les servocommandes des avions plus anciens, agissant à travers des actuateurs, sont seulement réglables par contrôles d'efforts ou-et d'accélérations. Des vibrations ou des flottements du manche préviennent des approches de décrochage (stick shaker, stick pusher). Les commandes de vol électriques des avions récents contiennent des protections automatiques qui interdisent l'excursion hors du domaine de vol (suivant les lois normales, mais pas forcément en secours[80]), avec alarmes associées pour les situations périphériques. Rappelons que l'*intégration* des commandes de vol électriques manuelles et du PA est réalisée en permanence sur l'A350.

**Simplifier l'IHM* : Que demander de plus, sinon *moins* de vérifications à effectuer pour valider le fonctionnement de tant de matériels présents à bord, et de tant d'informations et de commandes mises à la disposition d'un équipage ?

N'oublions pas qu'avec deux pilotes à bord, la duplication des instruments de bord individuels et les doubles commandes correspondantes peuvent générer des situations embarrassantes en cas d'informations discordantes, malgré certains dispositifs automatiques d'identification et d'invalidation d'un appareil défaillant. La *cohésion du travail des deux pilotes* (CRM) est un problème important qu'on tente de résoudre *dans le cadre de leur formation*.

[80] alors que c'est le cas où les protections seraient les plus utiles.

C'est dans cette voie apparentée aux sciences cognitives que se précise la complémentarité de l'homme et de la machine. Il ne s'agit pas tellement d'imaginer des nouveaux systèmes, mais d'implémenter ceux qui existent pour les utiliser mieux, surtout en situations dégradées. Cet appoint peut se matérialiser par un « co-pilote électronique », ou par des « prothèses » apportant aux opérateurs une aide qualitative[81]. Ces questions déjà abordées en fin du sous-chapitre « Comment (di)gérer le millefeuille » sont développées dans les livrets 3 et 4.

**Sécuriser le comportement humain* : Retenons que la concentration des informations offertes dans un cockpit et la variété des commandes disponibles nécessitent un approfondissement des études d'interface avec le pilote pour la surveillance de sa vigilance et de sa capacité de mise en éveil. Des stimulateurs spécifiques tenant lieu de prothèses sont destinés à augmenter les facultés de l'humain (en particulier détecteurs-correcteurs de stress et de fatigue …). A cet égard, les récentes réalisations dans les secteurs automobile et ferroviaire [82] sont sans doute à prendre en considération.

En attendant que les progrès des automatismes permettent ainsi à l'opérateur humain d'entrer en symbiose plus étroite avec sa machine, on souhaite modestement voir aboutir des progrès en ergonomie, en hiérarchisation des urgences, en meilleure clarté des informations et des commandes, afin de leur donner plus de cohérence lors de leur utilisation.

Quelques précisions sur les équipements des glass cockpits sont apportées en **Annexe 8.**

Quelques sujets d'actualité

Traitement des urgences

Aider un pilote avec des automatismes *présents à bord* devrait être a priori plus facile à mettre en œuvre qu'une mise à disposition *immédiate* de *moyens au sol* élaborés, en raison des *durées de transmission et d'interprétation* nécessaires à l'opérateur sol censé intervenir en secours. *L'urgence des décisions et des manœuvres* est à la base du choix des solutions, et il importe de recenser les très nombreux cas où un pilote doit réagir de manière appropriée en quelques secondes, pour simplifier les actions requises, (par exemple en cas de remise des gaz ou évitement). Egalement, *l'étude des transitions plus ou moins brutales entre vol normal et vol dégradé* est un problème particulier où la promptitude et l'adéquation des automatismes et des interconnexions constituent un point délicat dans la majorité des situations.

De nombreux progrès s'accomplissent dans ce domaine qui met conjointement en jeu, d'une part la technique, et d'autre part les compétences cognitives de l'humain, (cf. livrets 3 et 4), par exemple pour automatiser sous contrôle du pilote la gestion des modes de secours en cas de panne. Mais est-il réaliste d'envisager à court terme une gestion automatique totale sans intervention humaine *capable de couvrir la quasi-totalité des cas à traiter* ?

On a cherché toutefois, à travers le développement des automatismes, à rendre de moins en moins nécessaire une réaction quasi-immédiate du pilote ; un bon exemple, développé à la fois par Boeing et Airbus avec des solutions différentes, est de disposer d'un contre immédiat et automatique de la panne moteur au décollage.

[81] Bien que visant au même résultat, les deux démarches sont fondamentalement différentes, voire opposées à certains égards : le co-pilote électronique se substituerait à l'homme et diminuerait sa charge de travail en le « privant » de certaines prérogatives, alors que les prothèses serviraient l'efficacité grâce à une intervention humaine augmentée quantitativement et en valeur.

[82] Vibrations de commande à rythme de répétition *aléatoire* pour prévenir la somnolence (SNCF).

Prévention des collisions

Un autre secteur où l'automatisation et les liaisons avec le sol ou avec d'autres avions interconnectés sont à développer est certainement celui des risques de collisions et de heurts d'obstacles, dont les exemples sont encore trop fréquents. Les moyens existent pour les collisions en vol, (TCAS, transpondeurs modes C et S), ou sont en cours de développement pour le contrôle (ADS-C et -B …)[83], mais ils sont encore trop souvent limités à la surveillance (passive) des risques et ne sont pas exploités systématiquement *en mode actif*. Notons cependant que le suivi automatique des ordres du TCAS par le PA est maintenant disponible sur les Airbus récents. Les insuffisances de ces systèmes sont surtout dues à des carences d'organisation et de financement, car les cas techniquement inévitables sont rares.

Un problème particulier concerne la surveillance fine d'état des pistes et taxiways, la détection de vols d'oiseaux, et les consignes d'urgence à appliquer aux véhicules d'aéroport. Des moyens et procédures de contrôle et guidage de mouvements au sol ont été développés et implantés sur certains aéroports (Surface Movement Guidance and Control Systems : SMGCS). Des systèmes encore plus avancés, plus performants, sont en cours de développement (A-SMGCS), les associations de détecteurs d'anomalies et de GPS différentiels y sont utilisées.

Automatisations au sol

l faut considérer l'accroissement souhaitable de dispositifs automatiques interconnectés hors du cadre strict des appareils volants et de leurs aides à la navigation. Divers systèmes sont étudiés pour éviter les collisions au sol entre aéronefs, ou avec un bâtiment, un véhicule, etc …

Dans les aéroports, le roulage au sol, l'avitaillement, le transfert des bagages, les aménagements d'acheminement des passagers [84] et leurs liaisons aux transports terrestres, bien d'autres questions souvent évoquées et restant non résolues à ce jour, pourraient aisément faire appel à des systèmes automatisés. Mais l'amplitude et la rapidité du déploiement des innovations, dans un trafic en augmentation permanente, supposent des investissements audacieux que ne facilite pas à court terme le contexte financier actuel.

Conclusion : Les hommes et l'avionique

Les pilotes d'aujourd'hui touchent de plus en plus à leurs claviers et de moins en moins à leur manche latéral, ils « assistent » (à ?) leur vol programmé (monitoring) plus qu'ils ne le réalisent manuellement (si tout va bien). Davantage d'automatisation (imprudente) pourrait les conduire à n'intervenir que dans des circonstances assez exceptionnelles pour être devenues des « surprises » (avec effet falaise) venant désarçonner des compétences exercées trop rarement.

Que signifient exactement les termes de surveillance, de vigilance, de fatigue, pendant un vol de long courrier ? Les passages en simulateur peuvent-ils restituer l'ambiance du réel, ou suggèrent-ils une réalité virtuelle aliénante ?

Et quels enseignements peut-on vraiment tirer des réactions sous stress expérimentées sur simulateur ?

On a esquissé l'abord de ces problèmes dans l'**Annexe 9**, en partant de réflexions sur l'histoire du métier de pilote.

[83] ADS : Automatic Dependant Surveillance, -B (Broadcast), -C (Contract).
[84] Les services aux passagers dans un aéroport sont en voie de modernisation, prenant en compte l'omniprésence des smartphones, et l'apparition de nombreux objets connectés.

Chapitre 3 : En Conclusion, RAPPELS et PERSPECTIVES

Le lecteur aura pu remarquer que, dans ce livret, l'accent a été mis sur la complémentarité Homme-machine, présentée d'abord dans son contexte historique. En passant progressivement des considérations générales du Chapitre 1 (objectifs et fonctionnalités) à des aspects de plus en plus concrets, on a esquissé dans le Chapitre 2 un panorama des automatismes de bord actuels, détaillé dans les **Annexes 7** et **8**.

L'ensemble de ces éléments incite à une synthèse inspirant quelques réflexions qu'on souhaiterait constructives.

Evolutions de la formation des équipages

La méthode corrigeant les rajouts d'automatismes apportés par couches successives (millefeuille), au moyen d'interconnexions et d'intégrations en groupes fonctionnels, a jusqu'ici bien servi le transport aérien, à en juger par les améliorations de capacité, de fiabilité, de sécurité et d'économie. Des améliorations de pratiques opérationnelles et de formation y ont contribué autant, sinon plus. Cependant, l'expérience révèle des situations que l'équipage a du mal à gérer, soit parce que les informations utiles sont trop disséminées (Météo…..) pour une compréhension en temps utile, soit parce que les actions nécessaires ne sont pas faisables dans le temps imparti (remise de gaz biréacteur, cisaillement de vent …), soit parce que l'avion en situation dégradée est très différent de l'avion normal tout en restant pilotable, mais exposé à l'effet de détériorations cumulatives de son comportement qui peut diverger brutalement et devenir déroutant, conduisant à un *effet falaise*.

La prochaine frontière est donc peut-être de *concevoir des machines qui soient mieux exploitables quand les choses vont mal*, par des êtres humains formés à leur tâche de pilote de ligne, mais « normaux », c'est-à-dire non exceptionnels dans leurs réactions.

Les progrès techniques en Aéronautique s'étant construits par ajouts, il en a été de même pour la formation des équipages, qui ont vu (historiquement) leur formation classique de base s'enrichir par des compléments successifs, sans (parfois) possibilité de vérification cohérente concernant la mise en pratique des connaissances. *En ayant rajouté des tâches nouvelles à une durée constante de formation*, on a dû supprimer des tâches plus anciennes, surtout manuelles, en pensant que les automatismes ne les rendaient plus nécessaires. Est-ce en réalité toujours le cas ?

Notons que la recherche approfondie de la sécurité est un motif pour ne pas précipiter des changements prématurés, mais reconnaissons aussi que le coût et le rendement financier des modifications sont des éléments essentiels pour modérer leur avancement.

Il importe à présent que les pilotes des avions de l'avenir soient intellectuellement bien adaptés, dans leurs compétences, aux nouvelles configurations de futures machines *à dominante informatique,* résultant de véritables mutations : qu'ils soient à leur bord, ou au sol en tant que télé-pilotes, ils auront à maîtriser des appareils qui ressembleront probablement de plus en plus à … des drones.

En bref, le « fin pilote » de demain n'aura sans doute pas à se distinguer par son habileté et son coup d'œil, mais il devra savoir « contrôler », en profondeur, des automatismes de haut niveau. Comment faire évoluer sa formation ?

Que peut-on espérer de plus ?

L'accélération technologique actuelle s'accompagne de développements surprenants en recherches fondamentales et appliquées. Mais, à la différence des temps héroïques de l'Aviation, la mise en jeu *immédiate* est freinée par la nécessité de préserver la sécurité des vols, objectif qui ne peut être garanti

qu'après des périodes prolongées d'études et d'expérimentations probatoires, et après certification. On doit aussi tenir compte de transitions avec l'existant, que l'augmentation de densité du trafic peut rendre difficiles.

**Difficultés des intégrations et interconnexions d'automatismes* : Le regroupement des automatismes en sous-ensembles interconnectés conduit à un système complexe, où chaque défaut d'un des sous-ensembles peut dégrader les performances du système global, suivant un processus logique et a priori déterministe. Un humain, plus intuitif et moins soumis aux algorithmes, saurait « potentiellement » contourner ces difficultés, par exemple en déconnectant le sous-ensemble *reconnu défectueux* et en branchant à la place un dispositif redondant disponible et adapté. Mais l'orientation de la décision de l'opérateur est généralement malaisée car il doit prévenir un incident dont les prémices sont généralement peu discernables, et souvent cachés par des automatismes à fonctionnement transparent pour cet opérateur.

Pour intégrer des sous-systèmes sans altérer la sécurité, on peut donc :

- laisser l'humain dans la boucle en lui facilitant la coopération avec la machine (intelligence partagée), solution évoquée au début du Chapitre 2 « Depuis les années 80 ».

- ou concevoir le système complet avec un niveau suffisant de fiabilité, incluant un système expert déclenchant l'isolement des défauts repérés et leur réparation par mise en service automatique de sous-ensembles redondants, si possible de technologies différentes (comme dans l'A350).

**Adaptation des automatismes aux comportements humains* : Malgré une grande prudence avant les mises en exploitation, les cockpits modernes peuvent refléter, sous certains aspects, des progrès insuffisamment « digérés » par les utilisateurs : on n'a gagné en automatisation qu'au prix de programmations compliquées des ordinateurs de bord (FMS), les visualisations offertes sur PFD et ND sont très riches, leurs informations peuvent être difficiles à conceptualiser mentalement en permanence et instantanément. Le rôle de l'humain se traduit finalement en choix souvent trop diversifiés pour assurer en temps voulu des interprétations efficaces … et le filtrage par la machine des données entrées par le pilote risque de déformer ses intentions. Ce point lié à la détection et à la correction d'anomalies fait l'objet d'actives discussions qui sont abordées dans les prochains livrets.

En résumé, *simplifications ergonomiques et connaissance du comportement humain* deviennent plus que jamais indispensables sur les avions actuels, mais, on le sent bien, la création de « prothèses intelligentes » ne sera pas forcément la panacée.

Si on limite la prospective à quelques décennies, il semble difficile d'espérer plus que réussir l'application opérationnelle des technologies les plus récentes (encore au stade du pré-développement), compte tenu des durées nécessaires pour assurer la mise en œuvre avec les niveaux requis de fiabilité/sécurité, jusqu'à la certification. N'est-ce pas déjà là un objectif ambitieux ? Imaginer d'aller au-delà[85] relève probablement de l'utopie et presque certainement d'un manque de réalisme, sachant que les avions de transport de passagers existants ou en cours d'études continueront de voler encore en 2050, et compte tenu du fait que le manque d'homogénéité de la flotte mondiale peut jouer un rôle dans la sécurité.

Frontière Homme-machine

Analyser les facteurs d'accidents du passé conduit à y remédier. Il est également souhaitable d'approfondir, en conjonction avec la prise en compte des facteurs humains, la *raison d'être* des

[85] Rappel : Puisqu'on fait voler des drones, certains pensent qu'on pourra se passer de pilotes, les supprimer ou les transformer en simples programmeurs de missions configurées, automatisées puis exécutées sans faille. C'est minimiser l'insuffisance de fiabilité actuelle des drones, et les nombreuses actions journalières accomplies par les pilotes pour éviter les incidents et les accidents.

composants de nos machines, et de préciser davantage, tout en l'élargissant, la *notion d'automatisation*, en réfléchissant aux implications de son possible caractère aliénant.

En effet, les innovations techniques *attendues ou non* se précipitent vers nous à profusion et échappent en partie à notre contrôle. Leurs excès peuvent parfois saturer nos esprits, et nous détourner de décisions simples mais essentielles.

Les « facteurs humains », impliqués dans la majorité des accidents actuels, devront toujours être pris en compte face à la complexité envahissante des artefacts et des données à traiter[86]. *Le rôle du pilote, répétons-le, est sans doute appelé à changer de nature avec une charge de travail moins physique mais plus intellectuelle, nécessitant une mise en éveil permanente pour acquérir et garder la maîtrise de son système volant. Cette question est sans doute à la base du thème central de l'aviation automatisée et interconnectée.*

Automatiser davantage un aéronef ne signifie pas nécessairement le faire fonctionner de manière plus autonome. Un supplément d'automatisation s'accompagne souvent de l'interconnexion avec des services externes, comme on l'a évoqué à maintes reprises. A partir *d'exemples concrets à définir*, on doit poser la question du rôle des automatismes et des interconnexions, non pas seulement dans les avions, mais dans le transport aérien *considéré globalement*[87], en précisant notamment les apports innovants susceptibles d'alléger, ou de déporter au sol, certaines tâches de pilotage ; on aura nécessairement à incorporer dans la réflexion des aspects concernant *l'avenir du contrôle aérien*[88], en gardant comme fil conducteur le respect et l'amélioration possible, sinon indispensable, de la sécurité et de la sûreté.

Cette analyse *à partir d'études de cas,* qui sera abordée dans les livrets suivants, devrait aider à cerner le rôle de l'humain dans le contexte du proche futur qui est conditionné par un afflux d'innovations en matière d'informatique et d'autres techniques (NBIC) [89], non sans implications technico-économiques pour le transport aérien de demain.

Comment orienter les progrès ?

Les progrès peuvent être envisagés de manières très différentes, non seulement suivant le rôle qu'on souhaite attribuer aux opérateurs humains, mais aussi suivant la mission dévolue au vol, et suivant les enjeux concernant l'ensemble des acteurs du Système de transport aérien. Ce dernier point impose diverses exigences fondamentales répertoriées dans l'**Annexe 10**, rédigée par A. Joselzon.

D'un point de vue *purement théorique*, si une mission pouvait être définie *sans modification possible*, l'avion pourrait être un robot sans pilote et sans assistance extérieure, un *missile civil autonome* au programme arrêté, incontournable. Ce cas limite n'est évidemment pas envisageable dans la réalité[90]. On pourrait cependant l'assimiler à une extrapolation du vol actuel automatisé depuis le décollage jusqu'à l'atterrissage*, mais sans besoin « réel » (c'est-à-dire hormis communications règlementaires) d'intervention des moyens au sol*. Le contrôle aérien resterait sollicité pour assurer la programmation des missions et la disponibilité des pistes, mais n'aurait pas d'action systématique au cours des vols, sur leur durée, sur les modifications de vitesse et d'altitude, sur les consignes de déroutement ou d'approche … et quelle que soit la météo !

---

[86] En substituant aux nombreux cadrans d'indications basiques des écrans figurant des données synthétisées, on a transformé ce qui était une charge visuelle (d'interprétation immédiate) en concept de plus haut niveau donnant à réfléchir pour « comprendre ». Mais on reste confronté, dans les deux cas, à la complexité *permanente* de ce que représente le pilotage d'un avion.

[87] cf. schémas de l'**Annexe 5**.

[88] Non pris en considération dans ce livret, cf. Avant-propos, fin.

[89] Nanotechnologies, Biologie, Informatique, Sciences Cognitives.

[90] Ce cas correspond à la suppression des entités pilote et assistance extérieure de l'**Annexe 5**.

Pourquoi devons-nous écarter une évolution aussi radicale ? Trois raisons au moins peuvent être invoquées :

- les *impondérables* liés aux risques de pannes, à la météo [91] et aux divers incidents affectant les personnes présentes à bord,

- la *flexibilité* obligée des missions due aux indisponibilités momentanées de pistes et de terrains, compte tenu de la densité de trafic,

- l'*imprévu* sous toutes ses formes quantifiables (probabilistes) ou non, avec des cas échappant à toute logique (pas d'algorithmique possible).

Partant de tels arguments *négatifs*, on pourrait cependant essayer de concevoir, *au niveau de la Recherche avancée*, divers aménagements visant à leur répondre *point par point*, mais de façon cohérente, *en partant de la notion de « missile civil » et en la remodelant par étapes,* de manière à ***n'introduire le facteur humain que dans les occurrences où il serait reconnu indispensable***. Cette démarche serait similaire à celle suivie dans le domaine des techniques spatiales (du V2 vers la navette habitée), et dans le passage du missile de croisière au drone militaire flexible (nEUROn …). On *irait en sens inverse du processus qui consiste à corriger ponctuellement les insuffisances actuelles du transport aérien en ajoutant des perfectionnements de plus en plus sophistiqués, qui risquent d'apporter des complications exagérées et de ne pas améliorer l'efficacité globale.*

Il va de soi que les militaires devraient être plus favorables que les civils à ce type de *démarche inversée, qui consisterait à ne rajouter pragmatiquement de l'humain à un automate (initialement autonome) qu'en cas de besoin avéré*. A l'opposé, *perfectionner* classiquement les équipements de l'Aéronautique civile en adaptant la formation de leurs opérateurs ne bouleverse pas les bureaux d'études et contribue à des améliorations continues, servies par l'abondance des innovations technologiques actuelles.

Continuité ou ruptures, rôle de la Recherche

Il semble évident que les avionneurs et les équipementiers, les Compagnies, les Organismes du Contrôle aérien et de la Règlementation, et enfin les usagers, auraient à supporter des changements majeurs de leurs stratégies et de leurs habitudes acquises, pour que devienne réaliste la perspective d'avions commerciaux sans pilotes opérant massivement en autonomie quasi-totale (sans télé-pilotage déporté au sol).

Cette éventualité n'a été qu'effleurée dans ce livret limité à des considérations générales sur l'histoire et le présent des automatismes aéronautiques. En revanche, avoir un seul pilote présent à bord va dans le sens historique des réductions d'équipage. Ce sujet est largement abordé dans les livrets 3 et 4. Ce faisant, on peut sous-entendre qu'on parviendra peut-être, dans un futur lointain, à se passer des services de cet unique opérateur si sa fonction se révèle un jour consacrée de fait, et *uniquement*, à une surveillance (monitoring) passive. C'est dire qu'on laissera du temps au temps avant d'en arriver au drone de transport de passagers qui poserait beaucoup de problèmes d'intégration dans le trafic et ne saurait sans doute être bien reçu par le public.

Nb : Notons cependant au passage une caractéristique exceptionnelle à portée d'un avion autonome : il pourrait rester manœuvrable et performant tout en étant instable et *impossible* à *piloter* manuellement, son CAG[92] allant très au-delà des compétences humaines. On tirerait sans doute de multiples profits d'une telle particularité, ne serait-ce qu'en acceptant des déplacements du centre de gravité beaucoup plus élevés que ceux actuellement pratiqués, (minimisant ainsi les transferts de carburant et facilitant les chargements).

[91] Les risques de panne peuvent être minimisés par amélioration de fiabilité, mais ce n'est pas le cas des risques naturels (météo, environnement).
[92] CAG : Contrôle Automatique Généralisé.

Faisabilité des ruptures ?

On vient d'esquisser, dans le paragraphe précédent, en écartant son aboutissement avant 2050, la démarche qui consisterait à étudier et expérimenter des avions autonomes pour les rendre progressivement de plus en plus crédibles au fur et à mesure de la résolution des problèmes rencontrés. C'est un sujet qui concerne « presque » exclusivement la Recherche, mais dans un cadre proche de l'actuel si on se propose d'insérer des prototypes, puis des séries très limitées d'appareils à fonctionnalités initialement plus modestes que celles des avions classiques : on devra supprimer la quasi-totalité des « impondérables » et s'imposer une diminution de « flexibilité » des missions. En revanche, on n'envisage pas de remède à « l'imprévu », autre qu'une mise en sauvegarde provisoire, car il s'agit de cas difficiles à répertorier mais supposés pouvoir devenir un risque très faible si les « exigences principales » sont satisfaites pour l'automatisation et la fiabilité générale :

Exigences principales :

- *fiabilité des équipements supérieure à l'actuelle,
- *maintien dans le domaine de vol, quels que soient les risques météo et pannes,
- *détection des dangers météo, évitements et retours automatisés à l'itinéraire programmé,
- *détection et traitement des pannes et incidents avec décision automatisée de modes dégradés,
- *signalisation aux aéronefs voisins, évitements automatiques,
- *choix automatisé de détournements et terrains de secours préprogrammés,*
- *pas de changement de programme imposé en vol par le sol, sauf indisponibilité de terrain d'atterrissage.*

*Les lignes avec * concernent les progrès souhaitables aussi pour les avions pilotés.*

Avantages :

- pas d'IHM, ni de cockpit, aucun automatisme passif nécessaire si autonomie totale,
- respect de la programmation des missions, (priorité dans le trafic),
- rôle du Contrôle sol très réduit,

Inconvénients :

- manque de flexibilité des missions (préprogrammées seules exécutables),
- longues expérimentations réservées au fret, avant d'envisager le transport de passagers,
- limitation durable aux destinations « faciles », utilisation de parcours non conventionnels.

Il va de soi que de telles « ruptures » ne peuvent s'accommoder que de projets globaux très différents de la notion d'avion classique, dont l'avionique est construite pour un équipage, et dont le comportement en vol est nécessairement compatible avec un pilotage manuel.

Conclusion

Les deux derniers sous-chapitres ont évoqué l'éventualité d'appareils autonomes, entièrement automatisés, hypothèse considérée comme irréaliste avant 2050, mais *ce sujet reste sous-jacent quand on s'intéresse à « plus » d'automatismes de bord*. *Que veut-on*, pour augmenter la sécurité et l'efficacité ? Considérons 3 choix possibles :

1 -introduire de « nouvelles fonctionnalités » d'automatismes servies et contrôlées par des « nouveaux » pilotes,

2 -n'utiliser le pilotage manuel, ou la décision de mise en sauvegarde, qu'en cas de dysfonctionnements d'automatismes ou-et de situations critiques,

3 -parvenir à la longue à des avions commerciaux autonomes.

Les tendances 1 et 2 correspondent à l'exposé du présent livret, présenté dans l'esprit d'une continuité historique où les innovations ont été introduites jusqu'à présent sans rupture dans l'évolution des avions (cas 1). Radio, gyros, asservissements, électronique transistorisée, radars, géolocalisation radioélectrique, puis inertielle et satellitaire, sont apparus sans changer fondamentalement le métier de pilote, à l'addition près des charges de radio, navigateur et mécanicien, survenues progressivement. Mais depuis deux ou trois décennies la révolution du numérique semble prometteuse de mutations qualitatives correspondant au cas 2.

En revanche, l'hypothèse 3 ne concernerait pas que les aéronefs, elle affecterait l'ensemble de l'organisation du transport aérien, en déléguant à des automates les responsabilités traditionnelles et basiques de pilotes devenus fonctionnellement inutiles. Privés de directives à communiquer, les contrôleurs aériens perdraient une grande part de leurs prérogatives. Mais de leur côté, les concepteurs, constructeurs et équipementiers auraient de nouvelles opportunités à exploiter techniquement, (les aspects économiques n'étant pas pris ici en considération).

Retenons enfin que les drones militaires sont là, depuis peu, et que leurs progrès iront de pair avec les conflits de demain et d'après-demain : n'oublions pas, hélas, tout ce que les guerres ont apporté à l'Aviation.

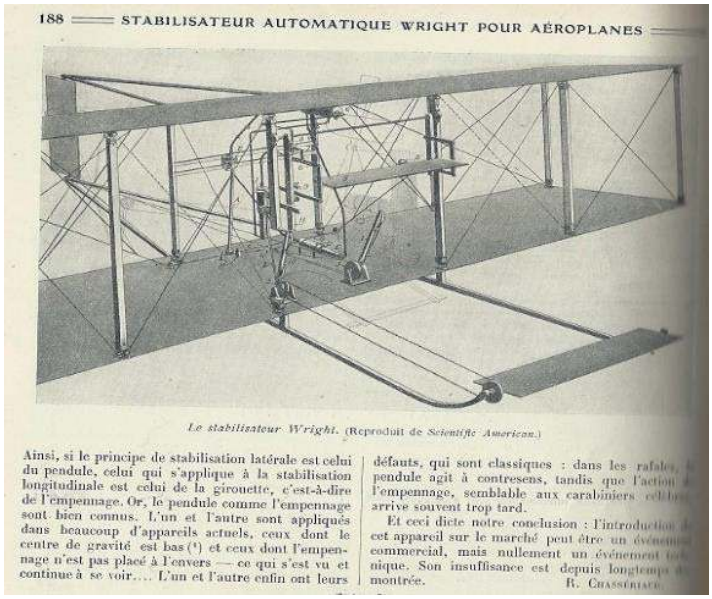
Mais pensons aussi que le poids économique et sociétal du secteur civil s'augmente sans cesse et impose jusqu'ici aux humains de maintenir et d'accroître toutes les activités productives. Après tout, ce seront peut-être les passagers qui auront le dernier mot en exigeant de conserver un commandant de bord qui les accueille aimablement et *voyage avec eux*.

Notre inaptitude physiologique à voler donne à l'aviation une spécificité fondamentale qui la distingue des transports terrestres et maritimes. Nous pouvons marcher ou nager sans « prothèse », alors qu'évoluer dans l'air, qui ne nous soutient pas naturellement, exige que nous soyons « augmentés » par une machine *qui nous isole* dans l'espace. Accepterons-nous que cette opération devienne uniquement « machinale », et automatisée au point de ne dépendre que d'une « intelligence artificielle » ? Est-il pensable qu'un passager, qui ne pourra envisager de quitter l'appareil, (à la différence d'un occupant de véhicule terrestre qui peut stopper à tout moment), admette aisément qu'entre sa personne et l'environnement aérien n'existent que des artefacts matériels et des ondes hertziennes ? Ce « client » ressentira sans doute une impression de « déshumanisation ». Rester proche de responsables compétents présents à bord, capables d'actions efficaces relevant de leur autorité de décision, c'est le lien historique et cohérent qui lie le voyageur aérien à tous les acteurs d'un grand Système, depuis bientôt cent ans. On imagine mal que cette association puisse être rompue.

Annexe 1 : Quelques rappels historiques

Les premières aides au pilotage et la radio avant les années 1930

**Aides au pilotage* : la *stabilisation longitudinale* était un problème majeur dans les avions des années 1910, très légers et sous-motorisés : la conception d'automatismes d'*aide au pilotage* date de cette époque, comme en témoigne la figure ci-dessous tirée de « La Nature » du 7/2/1914 :



188 STABILISATEUR AUTOMATIQUE WRIGHT POUR AÉROPLANES

Le stabilisateur Wright. (Reproduit de *Scientific American.*)

Ainsi, si le principe de stabilisation latérale est celui du pendule, celui qui s'applique à la stabilisation longitudinale est celui de la girouette, c'est-à-dire de l'empennage. Or, le pendule comme l'empennage sont bien connus. L'un et l'autre sont appliqués dans beaucoup d'appareils actuels, ceux dont le centre de gravité est bas (1) et ceux dont l'empennage n'est pas placé à l'envers — ce qui s'est vu et continue à se voir.... L'un et l'autre enfin ont leurs défauts, qui sont classiques : dans les rafales, le pendule agit à contresens, tandis que l'action de l'empennage, semblable aux carabiniers célèbres, arrive souvent trop tard.

Et ceci dicte notre conclusion : l'introduction de cet appareil sur le marché peut être un événement commercial, mais nullement un événement technique. Son insuffisance est depuis longtemps démontrée.

R. Chassériaud.

Stabilisateur d'assiette vers 1910

On peut aussi commémorer le centenaire des réalisations d'Elmer Sperry, résultant de ses travaux sur les compas gyroscopiques[93]. Son fils Lawrence a expérimenté en 1914 un des premiers PA rudimentaires[94], dérivé de réalisations pour la marine : le *maintien prolongé de tenue de cap* était un objectif limité par la nécessité de recaler fréquemment les gyroscopes à partir du compas magnétique.

**Radiocommunications* : inventées vers 1900, (Tesla, Branly, Marconi ...), elles ont été immédiatement appliquées à la marine et à l'aviation sous forme d'informations échangées en Morse avec des opérateurs au sol ou en mer, en MF-HF dès 1910 sur dirigeables, puis après 1914 sur avions d'observation et de réglage d'artillerie.

Les communications étaient peu fiables : en 1919, pendant le premier vol direct transatlantique, l'émetteur d'Alcock et Brown tomba en panne après trois heures de vol. En Septembre 1930, lorsque Costes et Bellonte traversèrent l'Atlantique, leur contact radio permanent avec la terre et les navires fut encore considéré comme un exploit (HF en Morse avec antenne pendante).

La radiotéléphonie s'est introduite progressivement vers la fin des années 1920, la VHF en phonie et les contrôles au sol n'ont apparu que vers 1930 (tours de contrôle), avec les premières infrastructures de radiocommunication gérées par les Services de la Navigation aérienne nouvellement créés.

**Aides à la navigation* : la première aide à l'approche, pour dirigeables, ancêtre de l'ILS d'aujourd'hui, a été brevetée par la société Lorenz, en 1908.

La situation a évolué lors de la guerre 14-18, avec l'apparition des premiers bombardiers « lourds » multi moteurs de 1918, préfigurés par Sikorsky (Ilya Mouromets fin 1913). Leurs rayons d'action et leurs capacités d'emport déterminèrent dans les années 20 la conversion vers le transport de passagers, confortée par le développement des communications, des radiophares aéro-maritimes en MF-HF, et de la radiogoniométrie sol à 450 kHz, (vers 1920, premiers NDB LF-MF *Fisher*).

Les années 30 : PA, ADF et VHF

En 1929, Doolittle a réalisé le premier vol « en aveugle » [95], atterrissage compris.

[93] cf. par exemple www.nationalaviation.org/sperry-sr-elmer.
[94] à Paris en survolant la Seine, lors d'un meeting, debout et bras levés dans son hydravion Curtiss.
[95] capote fermée, vol de 15 minutes aux instruments sur Consolidated NY2 Husky.

La vulgarisation des PA commença vers 1935 : Junkers équipa les Ju 52 (stabilisateurs, contrôle d'altitude) et Douglas les DC2 - DC3 (PA 3 axes).

Dans cette période, les PA 2D et 3D commencent à faciliter la pratique de vols IFR bénéficiant d'aides radioélectriques à l'efficacité croissante. Les radiogoniomètres embarqués automatiques (ADF) se développent progressivement, ainsi que la VHF dont la bande aéronautique internationale 108-156 MHz est créée vers 1935, (108-132 MHz, officialisée seulement en 1949). C'était la belle époque des électroniques à « tubes radio » !

La décennie 30-40 est celle des premiers longs courriers intercontinentaux, avec des aides radio sol étoffées mais des équipements de bord encore modestes en fiabilité et performances (mais non en encombrement !). En 1937, la disparition d'Amelia Earhart en porte témoignage. Toutefois, dans les grands hydravions transatlantiques et trans-Pacifique, à la fin des années 30, les opérateurs radio et les navigateurs ont été dotés de systèmes relativement sophistiqués mais volumineux : postes émetteurs-récepteurs HF, sextants périscopiques de navigation astronomique, et moyens de radio navigation hyperboliques après 1940.

Ces équipements ont subsisté jusqu'à la généralisation dans les années 1970-80 des centrales de navigation par inertie, et de l'automatisation par calcul numérique des moyens hyperboliques de localisation.

La guerre 39-45, et après ….

La seconde guerre mondiale a fait considérablement progresser à la fois la radionavigation (bande 108-118 MHz, VOR et DME, ILS) et les aides au pilotage, (PA, radioaltimètres [96] …).

Les innovations majeures concernent les systèmes automatiques de géolocalisation : premiers radars, et systèmes hyperboliques Loran, Decca, Consol-Sonne, Omega …. Les améliorations progressives des capteurs et des installations sol ont garanti la précision de la navigation dans le cadre de procédures RNP (Required Navigation Performance [97]), définissant les domaines libres d'obstacles ou d'autres aéronefs : quelques NM initialement, entre 5 et 0.1 NM actuellement. Parmi les premières utilisations RNP-RNAV, citons les traversées transatlantiques utilisant l'antenne Omega [98] désormais obsolète.

Jusqu'à l'avènement des réacteurs (Comet 1952), les longs courriers commerciaux (DC4 et 6, Constellation …) conservent leurs astrodômes [99] et leurs cadres gonio orientables, tout en s'équipant aussi de centrales inertielles autonomes (INS inertial navigation system). Dans les années 60-70 apparaissent les centrales inertielles hybrides, connectées aux aides radio (INS/RNAV). De nos jours les aides satellitaires GNSS (essentiellement GPS) sont venues les complémenter.

A partir des années 60, les VOR-DME et les ILS se sont généralisés, et les premiers atterrissages automatiques ont été expérimentés sur Caravelle, avec plafond 30 m et visibilité 200 m (Catégorie 3A).

Etapes techniques

L'automatisation du pilotage a commencé vers 1920 avec des gyros pesants et lents, convenant plus à la marine qu'à l'aviation (une vingtaine de kg en 1910 !). La chaîne du détecteur à la gouverne était pneumatique et/ou hydraulique, avec des cinématiques compliquées et des frottements omniprésents. Pour les radiocommunications (en Morse MF-HF), les électroniques à lampes étaient lourdes,

[96] et, pour mémoire, dans le secteur militaire, la ressource automatisée des bombardiers en piqué Stuka Ju87.
[97] nécessitant des bases de données préétablies stockées à bord.
[98] Ancien système aéromaritime hyperbolique VLF (circumterrestre) utilisant d'énormes antennes hautes de 400 m (dont une à La Réunion, maintenant détruite).
[99] Les sextants périscopiques ont servi aux navigateurs des premiers long-courriers à réaction, d'abord de façon routinière, et ensuite pour les vols spéciaux.

énergivores, et encombrantes, les antennes (pendantes) rudimentaires jusqu'aux années 40 (Yagi et filaires).

Les progrès décisifs sont venus dans les années 50 avec les transistors, permettant, entre autres ruptures innovantes, une première miniaturisation des moyens radio, qui a favorisé la suppression des radionavigateurs.

L'apparition des hyperfréquences (UHF et radar) dans les années 60 a profondément transformé la navigation. Les équipements DME et les radioaltimètres se sont généralisés, ainsi que les radars de bord permettant l'évitement des perturbations météo.

L'équipement sol en radars secondaires s'était développé vers la fin des années 50, généralisant l'usage des transpondeurs[100] (initialement de type A) pour tous les types d'aéronefs dans un contrôle aérien sectorisé.

Après 1980, l'Informatique s'est imposée progressivement, les technologies digitales ont abouti aux microcalculateurs d'aujourd'hui et à leurs innombrables applications. Nous en sommes maintenant à l'avionique des écrans plats, des nanotechnologies, des objets connectés, et des nouveaux systèmes/protocoles via des liaisons multiplexées du type Ethernet, véhiculant sur un seul fil des milliers d'informations (ou via des réseaux sans fil du type WiFi), en attendant l'optoélectronique.

Annexe 2 : Vers l'autonomie ou le télé-pilotage ?

*Un complément d'équipements est souhaité pour faciliter, voire effectuer sans intervention manuelle, le retour aux conditions normales de vol après des incidents techniques (givrage, panne…) ou opérationnels (décrochage en turbulences intenses, remise de gaz en urgence, prévention et évitement de collision, …).

Mais on peut constater aussi qu'inversement la reprise en main manuelle de la conduite d'un vol peut, dans maintes circonstances, être salvatrice dans des situations où le comportement des automatismes s'avère insuffisant. L'automatisme contribue à diminuer la charge de travail dans des conditions de vol nominal ou peu perturbé, mais c'est à l'homme, le plus souvent, de résoudre des problèmes difficiles en commençant par déconnecter des automatismes atteignant leurs limites d'efficacité. Suivant la nature des difficultés, qui aide l'autre, qui décide des actions, qui les réalise ? l'homme ou l'automatisme ?

Certains envisagent d'assister de plus en plus largement les pilotes, voire de les *remplacer* par des automatismes toujours disponibles, fiables, et de coût modéré malgré leur sophistication : les avions deviendraient *autonomes*. Des systèmes de télécommandes air-air et air-sol, (plus aides satellitaires), communicants et interconnectés, permettraient aussi à certaines fonctions de pilotage et de navigation d'être opérées à partir du sol ou d'autres appareils. Est-ce une bonne idée ?

*Diminuer la charge de travail des pilotes grâce à plus d'automatismes à bord justifierait de n'envisager qu'un seul pilote dans les avions de ligne. Rappelons qu'actuellement ceux de plus de 19 places ont deux pilotes, la sécurité *devant rester* assurée en cas de défaillance de l'un d'entre eux[101].

Aujourd'hui le copilote prend, pour sa part normale de la charge de travail, la communication avec le contrôle aérien. Un des deux pilotes intervient en cas d'incapacité totale ou partielle de l'autre, et il est présent pour le « monitorer » (en palliant la nature faillible de l'opérateur humain). Pour envisager l'équipage mono-pilote il faudrait :

- réduire la charge de travail,

[100] Dont l'ancêtre, pendant la seconde guerre mondiale, était l'IFF (Identification Friend or Foe).
[101] Probabilité de perte de connaissance 0,5 10^{-6}/h.

- prévoir en cas d'incapacité la détection et la reprise en main (par le sol, ou par un membre de l'équipage commercial, ou par les deux),

- mettre en place une surveillance permanente des actions du pilote (par le sol, dans les CCO avec un opérateur hautement qualifié monitorant plusieurs vols à la fois et aussi par la présence à bord d'automatismes de surveillance).

Etendre les avions mono-pilotes à l'ensemble du transport commercial pour des vols courts est concevable si la reprise de contrôle éventuellement nécessaire s'effectue à partir du sol tout en satisfaisant aux exigences de sécurité et de sûreté. Ce télé-pilotage *occasionnel* diminuerait certes le nombre des navigants, et les risques de piratage dans la mesure où l'on saurait prévenir les intrusions terrestres dans les ordinateurs et dans les télécommunications.

Il faudrait engager au sol des personnels nouveaux et hautement spécialisés, *disponibles instantanément et en permanence,* peu nombreux toutefois car ayant rarement à intervenir, et gérant plusieurs avions à la fois (une douzaine ?). Peut-on imaginer qu'ils aient la même efficacité qu'un co-pilote à bord ?

*Plus radicalement, et en se rapprochant de la configuration « drone », pourrait-t-on n'avoir à bord qu'un « superviseur » *non pilote* chargé de la seule gestion technique (hormis pilotage et navigation) de vols dont la *conduite* serait *entièrement* automatisée (avec reprise en main possible en permanence depuis le sol) ? La charge et le nombre des télé-intervenants devraient alors augmenter considérablement puisque leur disponibilité (monitoring[102] + télé-pilotage) devrait être permanente pour chaque appareil.

*Plus audacieusement encore, peut-on envisager des véritables drones civils commerciaux télépilotés *sans aucun personnel technique à bord* (hormis le service de cabine) ? Déporter au sol *l'ensemble* des fonctions dévolues aux navigants techniques (pilotage et gestion du système) serait probablement possible pour une fraction *réduite* du transport aérien global. On y songe actuellement pour le fret, mais on considère la généralisation au transport de passagers comme une vision lointaine à la limite de l'utopie. Techniquement, l'idée paraît concevable, mais on n'en voit pas vraiment l'intérêt économique, car le pilotage entièrement déporté, même automatisé à l'extrême, représenterait une surcharge de communications air-sol coûteuse, à fiabilité incertaine, et les responsabilités des télé-pilotes (nombreux) justifieraient probablement des salaires équivalents à ceux des navigants actuels.

Notons aussi que *l'incidence des drones de toutes natures* sur la sécurité aérienne impose dès à présent des règlementations nouvelles dont les pilotes ont à tenir compte ; il est peu probable que l'évolution de ces mesures puisse favoriser une diminution de présence et de responsabilité à bord.

Annexe 3 : Automatisation dans les transports terrestres et maritimes

Le rail : les trains à vapeur ayant disparu, un seul conducteur est désormais présent dans les motrices électriques et Diesel. Divers métros roulent sans personnel à bord depuis plusieurs décennies. Notons que le domaine du rail est linéaire et en sites propres gérés par des centres de contrôle, facteurs qui autorisent une sécurité élevée, comparable en km.pax à celle du transport aérien (dont l'environnement tridimensionnel est beaucoup plus complexe).

[102] Surveillance et réglage des paramètres de conduite du vol.

NB : Le maintien de vigilance traditionnel des conducteurs de train par appui régulier sur une pédale (dite d'« homme mort ») a été amélioré par un système à périodicité *aléatoire*. Un tel dispositif serait sans doute utile en croisière sur les longs courriers aériens ….

La route : le trafic routier ne bénéficie d'aucune assistance autre qu'une signalisation rudimentaire, hormis feux rouges en ville, bornes d'appel autoroutières, et … radars (plus modernes). La voiture « connectée » fait discrètement son apparition (sauf téléphonie et web déjà popularisés), elle permet de localiser les « zones dangereuses » et les « points d'intérêt ».

Certaines automobiles expérimentales roulent sans qu'on ait à toucher au volant, on tente avec prudence de les rendre totalement autonomes. Leur insertion dans un trafic dense et aux vitesses légales paraît encore problématique, mais de nombreux dispositifs d'aide à la conduite se multiplient sur les véhicules du marché, visant à ne faire intervenir le conducteur que par intermittences et en compensant certaines maladresses ou manques de dextérité (en particulier exécution automatique des créneaux).

NB : On envisage des « trains autoroutiers » de camions, pour lesquels seul le véhicule de tête serait conduit par un chauffeur, les autres camions suivant automatiquement à distance de sécurité. Des projets analogues semblent en cours d'étude pour des files d'avions suivant une même route.

La mer : les aides radioélectriques [103] et électroacoustiques, inventées au début du XXe siècle, ont été immédiatement utilisées en mer. Sonar, radar et GPS sont maintenant des équipements de base, ainsi que diverses formes de pilotes automatiques.

La robotisation transforme la manipulation des conteneurs dans les ports modernes, où l'*interface* mer-sol est dans ses principes à rapprocher de l'interface air-sol des aéroports.

Annexe 4 : Actif ou passif, et conception centrée homme ou machine

Un automatisme passif informe et met toujours en cause un opérateur, tandis qu'un automatisme actif peut fonctionner sans présence humaine.

Toutefois, ne rapprochons pas systématiquement de la notion de « passif » les conceptions responsabilisant plutôt l'Homme (human centered design) : c'est le cas des avions, *conçus pour être pilotés*, mais qui contiennent de nombreux *automatismes des deux natures* active et passive. S'il est vrai que les automatismes passifs mettent fortement et directement en jeu l'humain en l'incitant à agir, n'en déduisons pas, par opposition, que les automatismes actifs doivent être forcément associés à une conception centrée sur la « machine » (machine centered design) : lorsqu'ils sont de haut niveau, ils doivent être déconnectables, reprogrammables, et généralement remplaçables par des reprises de contrôle humaines.

Les conceptions centrées sur la machine sont celles des lanceurs spatiaux et satellites inhabités, ainsi que celles des missiles et des drones non télé-pilotés, mais ces engins contiennent de nombreux automatismes passifs destinés à informer le centre de contrôle de leur état de fonctionnement.

Notons par exemple qu'un centre spatial ne procède qu'à un lancement à la fois de fusée porteuse de satellite(s) (machine centered) en surveillant son déroulement (aspect passif) sans intervention (active) notable (hormis la destruction éventuelle). A l'opposé, une tour de contrôle ou un CCO gèrent (activement) un grand nombre de vols simultanés (human centered) en les co-*ordonnant* par des directives certes « passives », mais dont le caractère *obligatoire* se rapproche de l'«actif» : des injonctions très précises sont imposées à l'opérateur navigant qui doit les exécuter immédiatement en réagissant comme un « instrument ». C'était particulièrement le cas dans les années 40 (et après) pour

[103] D'abord, radiotélégraphie en ondes longues, puis ondes MF et HF, radiogoniométrie et, dans les années 30-40, géolocalisation hyperbolique.

les atterrissages au GCA [104]. De nos jours, l'ILS [105] en pilotage manuel autorise un peu plus de liberté mais relève de la même vocation ….

On distinguera donc parmi les automatismes passifs ceux qui incitent seulement à des actions, comme un directeur de vol FD (non impératif), et ceux qui traduisent des consignes imposées par la réglementation ou par l'assistance extérieure, en particulier en situation d'urgence (ex : alarmes) : obéir à un ordre est alors une *action* d'humain « instrumentalisé ».

Annexe 5 : Entrées-sorties d'automatismes passifs et actifs

*Le contexte d'un vol met en jeu, en plus de l'avion et de son pilote, d'autres intervenants qui se manifestent *dynamiquement,* entendons par là : au moyen de *flux* d'actions significatives par leur déroulement dans le temps (moment, durée, rapidité, fréquence, répétition …). Ce sont :

- *les services d'assistance extérieure*. Les organismes de contrôle (tour, ATM [106], CCO) imposent des directives et apportent des informations tout au long du vol : le plan de vol au départ ne peut pas faire connaître les ordres de déroutements, changements de niveaux de vol, et attentes qui pourront émaner éventuellement des services au sol,

- *l'environnement*. L'air environnant est mobile et changeant : l'ensemble des circonstances météo variables qu'on rencontrera en route (vents, orages, turbulences …) n'est pas toujours prévu au départ (sur le plan de vol). Il en va de même pour les obstacles naturels (le relief en cas d'appréciation incertaine de la hauteur, les vols d'oiseaux), et pour les autres avions ou obstacles sur piste avec lesquels un risque de collision existe.

Dans le fonctionnement du *Système avion* **S**, les *flux d'informations et-ou d'actions* à prendre en considération ne concernent pas seulement l'IHM comprise comme interface entre l'équipage (opérateur) et **S**, mais aussi les interfaces avec les assistances extérieures et l'environnement naturel dont on mentionnera les relations avec **S**, sans les préciser ici.

*Parmi les composants du système avion **S**, *individualisons* un automatisme de bord **A** particulier. C'est un dispositif à entrées et sorties liées à diverses entités **E** extérieures et intérieures à **S**. Le système avion **S**, (sous-système du STA, Système de Transport Aérien), contient un grand nombre d'automatismes (tels que **A**) qui sont en relation avec quatre entités :

E1 L'opérateur humain (le pilote), et ses prothèses **P**,

E2 La machine, (l'avion sans **A**), intégrant **A** dans **S = E2+A**

(**E2** contient divers automatismes autres que **A**),

E3 L'assistance et information extérieure (services d'aide à la Navigation, services Météo, CCO …), avec leurs machines et leurs opérateurs humains (au sol, en mer, véhicules coopératifs, satellites, signalisation …),

E4 L'environnement, *naturel* **E4n** aérien (pour la météo) et terrestre (relief), et l'environnement *artificiel* **E4a** (aéronefs proches, obstacles sur pistes …).

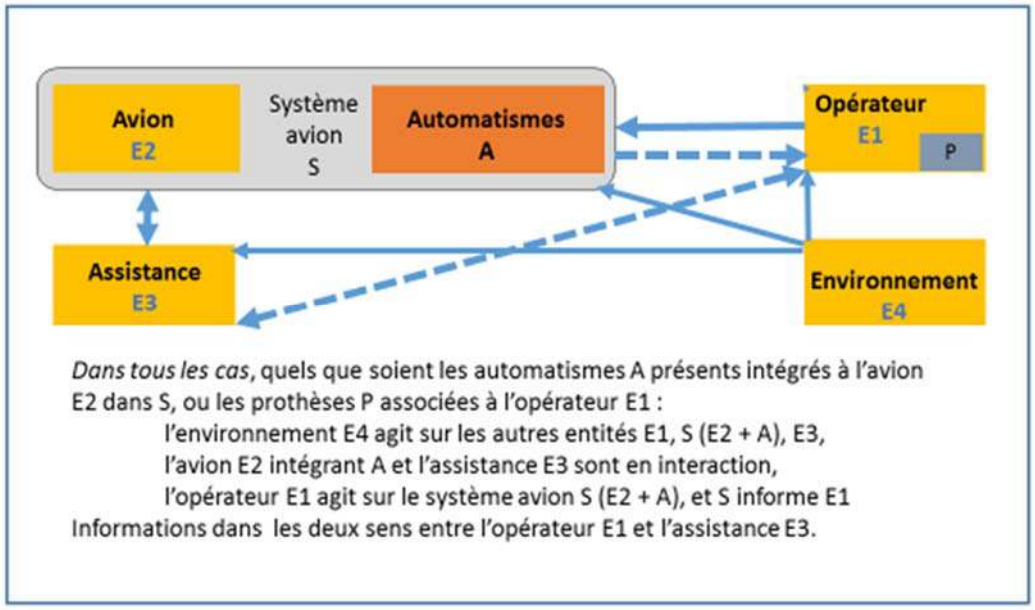
[104] GCA : Ground Control Approach.
[105] ILS : Instrument Landing System.
[106] ATM : Air Traffic Management.

***E4n** n'est pas modifiable, mais agit sur **E1, E2, E3** : les données *naturelles* de l'environnement **E4n** sont presque toujours dépourvues de tout artefact, (à l'exception des turbulences de sillage). **E4a** est supposé détectable, et (rarement) modifiable *indirectement* par **S, E1** ou **E3** à la suite de communications passant par **E3**, *ou **E4a** (ex : TCAS [107]).*

Certaines « prothèses » **P** peuvent être *directement associées à l'opérateur* **E1** pour augmenter ses performances. On les a intégrées à **E1** sans spécifier leurs types d'actions.

De nombreux automatismes externes sont à envisager dans les entités d'assistance **E3**, mais, pour simplifier, on ne considèrera ici que les seuls dispositifs automatiques tels que **A**, *intégrés* à l'avion **E2** et figurant dans son système **S = E2 + A**.

La figure ci-dessous schématise les flux d'informations et d'actions faisant intervenir **E3** et **E4** vis-à-vis de **S** et **E1** :



Flux d'actions et d'informations entre les 4 entités E.

Les entrées-sorties entre entités **E** sont des flux d'informations ou d'actions, représentés par des flèches. *Les flèches pleines sont des actions, les flèches en pointillé sont des informations*. Les flèches sont orientées à simple ou double sens.

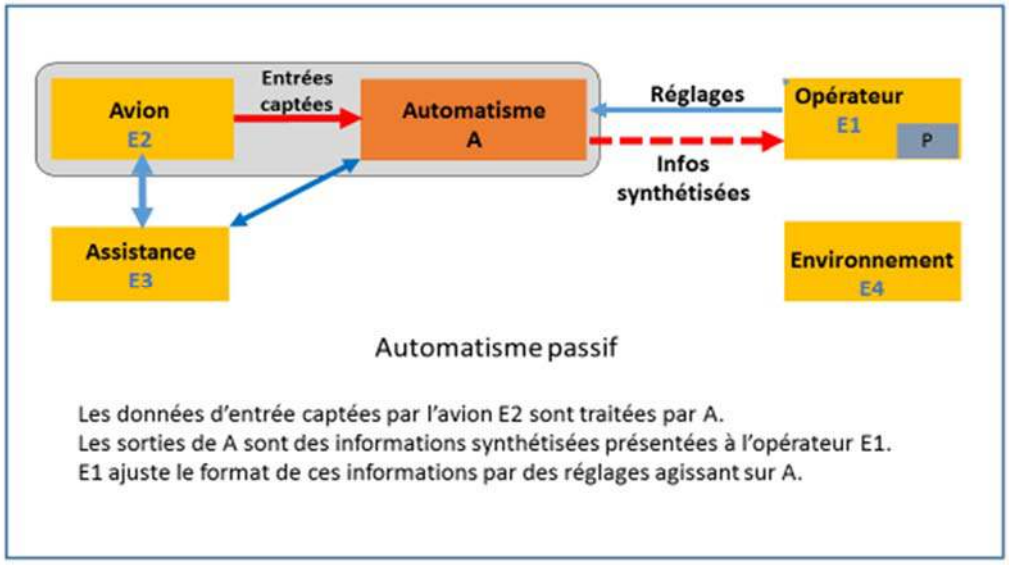
*Les deux figures suivantes concernent respectivement les automatismes passifs et actifs. Pour les rendre plus lisibles, on a représenté seulement les flèches d'entrée et sortie de l'automatisme **A**, *sans tracer les flèches du schéma de la figure ci-dessus, qu'on doit cependant considérer comme significatives et présentes dans tous les cas de figure, (actions issues de **E4** et infos entre **E3** et **E1**)*.

Le *sens des flèches rouges* dans ces deux schémas fait apparaître que les actions (entrées) et informations (sorties) d'un automatisme *passif* sont orientées de l'avion vers l'opérateur, alors que les actions liées à un automatisme *actif* vont dans le sens opposé opérateur (via **A**) vers avion, à l'exception des entrées provenant des capteurs de l'avion (présentes pour les deux types d'automatismes), et de l'assistance extérieure qui transmet éventuellement des données de programmation.

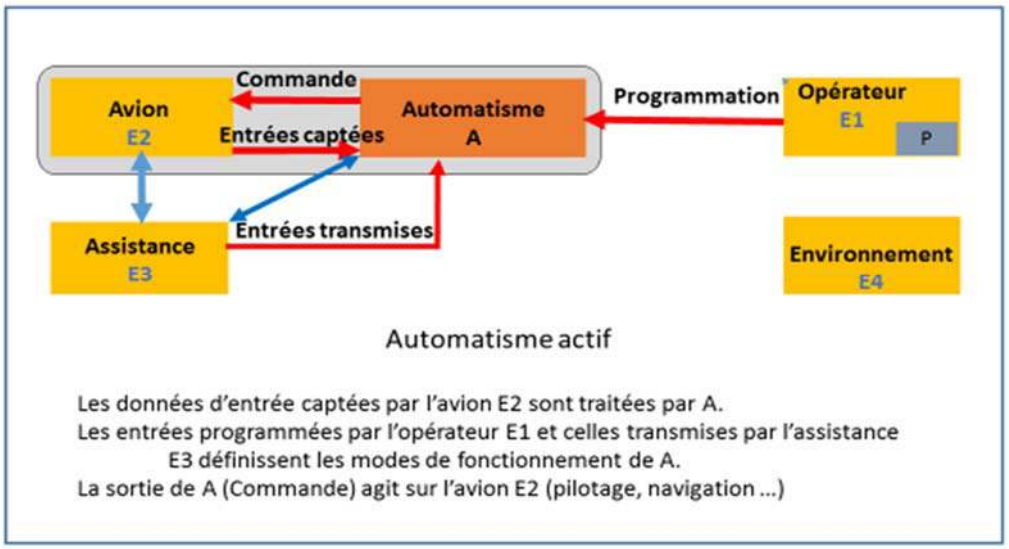
La flèche bleue oblique entre **A** et **E3** correspond à des échanges d'actions et d'informations entre ces entités : transpondeurs, signalisations …

[107] TCAS : Traffic Collision Avoidance System.

Dans les deux figures ci-dessous, les organes des automatismes tels que détecteurs, filtres, amplificateurs, différentiateurs et intégrateurs, etc… n'ont pas été représentés, ils sont généralement situés à l'intérieur de A, ou sont intégrés à **A** à l'intérieur du rectangle en grisé **S** du système avion. Les servocommandes de tous types sont supposées intégrées à **A**.



Automatisme passif



Automatisme actif

Annexe 6 : Blocs fonctionnels d'un automatisme

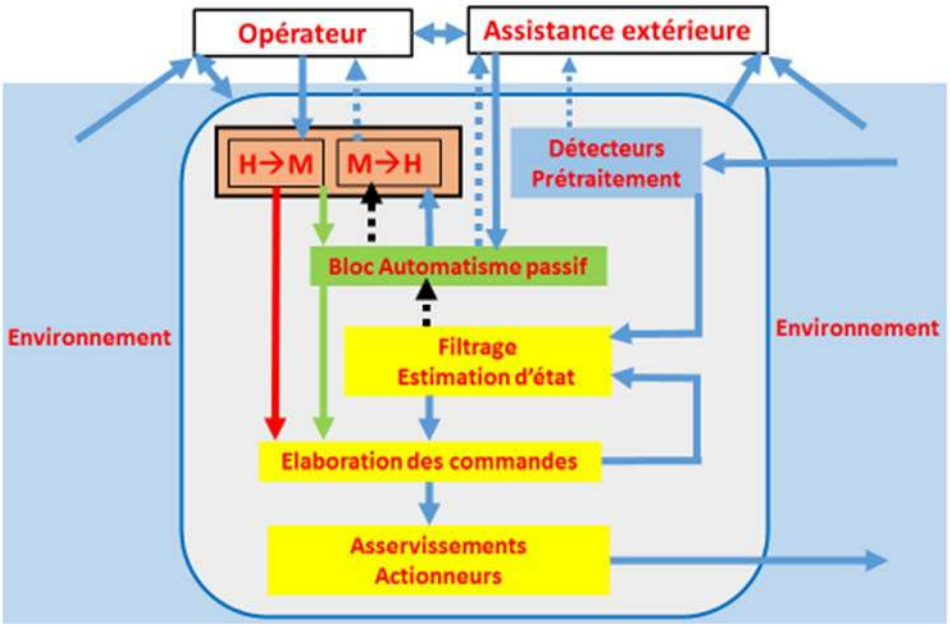


Diagramme d'un automatisme aéronautique

La figure ci-dessus schématise les blocs fonctionnels principaux d'un automatisme intégré à un avion (rectangle gris clair). Le cas de référence est le PA : les deux approches « passif » et « actif » y sont rassemblées dans une représentation unique applicable à un système de contrôle de l'avion.

Les flèches pleines orientées représentent des flux d'actions, les flèches en pointillé des informations.

L'interface homme-machine IHM a été individualisée par le cartouche beige, ce bloc correspond principalement à l'agencement du cockpit, contenant des organes de commandes (H→M) et des instruments d'apport d'informations (M→H).

Le bloc vert figure la *partie passive* qui est aussi la part amont d'un automatisme actif, dont les blocs sont colorés en jaune. Elle est liée dans les deux sens à l'IHM (flèches vertes de commande/réglage, flèche noire d'information) pour la *gestion des modes* de fonctionnement, et elle est alimentée (renseignée) par le *bloc d'estimation d'état* (flèche noire).

Ce bloc d'estimation *compare* les commandes, sorties du *bloc d'élaboration*, aux sorties prétraitées des détecteurs (en bleu*)* équipant l'avion, et renvoie ce « signal d'écart » à l'entrée du bloc d'élaboration. Le bloc d'estimation d'état fait apparaître aussi d'autres fonctions :

- *la fonction filtrage* (réduisant notamment les bruits de fond). Cette fonction s'étend

-à la réduction des interférences négatives avec les modes vibratoires de la structure,

- à la diminution des charges structurales dynamiques sur les gouvernes, les empennages et certaines parties de la voilure, (sans oublier une amélioration du confort des passagers).

- *la fonction renseignement du bloc passif* (flèche noire en pointillé) : le bloc passif interprète le signal d'écart différemment suivant la gestion de mode imposée par l'IHM et transmet la consigne qui en résulte à l'entrée du bloc d'élaboration (flèche verte) : c'est dire que la liaison bloc passif → Bloc de commande sert à *programmer* le mode d'élaboration des commandes par (H → M), à travers le bloc passif.

Le bloc d'élaboration contient le ou les calculateurs qui gèrent les algorithmes de commande, dans la chaîne directe et dans la branche de retour de la boucle d'asservissement, et il commande les actionneurs, amplificateurs et convertisseurs à forte consommation d'énergie.

Une flèche rouge joint directement le bloc (H→M) au bloc d'élaboration de commande : dans un PA, cette flèche qui correspond au *pilotage manuel* (PA désactivé) n'a pas à intervenir lorsque le bloc passif est programmé dans un mode de pilotage automatique (petite flèche verte).

Les actionneurs, manœuvrant par exemple les gouvernes dans le cas d'un PA, agissent finalement sur l'air environnant en modifiant le comportement de l'avion, dont les détecteurs d'attitude, altitude, vecteur vitesse, cap (en bleu clair) … fournissent le signal d'entrée du PA au bloc d'estimation d'état, amont de la partie active de l'automatisme.

Annexe 7 : Exemples d'automatismes récents

Avion connecté

*Les avions de transport ont, en fait, toujours opéré dans un environnement interconnecté, mais les moyens de communication, d'abord le Morse, ensuite la radiophonie, sont maintenant complétés et simplifiés par les *messages* automatiquement écrits et préprogrammés de l'ACARS (Aircraft Communication Adressing & Reporting System), et du CPDLC (Controller-Pilot Data Link Communication), servant l'équipage sans bloquer ses autres activités. Ainsi, les transmissions des données de maintenance et de plan de vol entre le FMS et le sol se sont transformées depuis les années 90, au bénéfice de la sécurité et de la gestion.

*Les radars secondaires (transpondeurs SSR), qui recevaient de l'avion un simple code d'identité (Mode A), reçoivent à présent matricule, numéro de vol, altitude, position GPS/GNSS, cap, vitesse, ainsi que les intentions de niveau de vol entrées par l'équipage, permettant ainsi d'augmenter la capacité de contrôle du trafic sans pénalisation de la charge de travail bord et sol. Ces informations émises par chaque avion sont reçues par les autres avions volant dans le voisinage, même lors des traversées océaniques hors de portée des radars secondaires, ouvrant ainsi la voie à une meilleure utilisation de l'espace aérien.

*Les équipements internes de l'avion sont interconnectés depuis plusieurs décennies par des *bus normalisés* (multiplexage impulsionnel numérique). Jusqu'aux années 90, les sous-systèmes tels que le train, les gouvernes, les moteurs, étaient commandés par des automatismes placés initialement dans leur voisinage et reliés au cockpit avec des câblages lourds et onéreux. La tendance actuelle est l'IMA (Avionique Modulaire Intégrée) qui regroupe en « étagères » des calculateurs standards hébergeant chacun une ou plusieurs fonctions correspondant aux blocs d'automatismes, servocommandes énergivores exceptées. On y gagne en performances, en poids, et en maintenance. La puissance et la mémoire des calculateurs permettent de les rendre multifonctionnels, leur compacité et leur coût modéré permet de les dupliquer (redondance) et de donner une importance croissante au développement logiciel. Enfin, l'utilisation de transmission par fibre optique se développe pour les liaisons exigeant un très haut débit d'information ou une immunité poussée par rapport aux perturbations du type foudre ou interférence électromagnétique.

Modernisation d'automatismes

L'automatisation est venue par étapes, soit à l'occasion d'un nouvel avion, soit en réponse à un problème important affectant tout le *Système Transport Aérien* (STA). Illustrons le processus qui a abouti au « millefeuille ». Ce terme quelque peu ironique, ou désabusé, exprime une certaine lassitude des utilisateurs à voir les équipements nouveaux *se superposer* aux anciens sans y apporter de simplification d'emploi, et en imposant au contraire un supplément de vigilance et de charge de travail. Par exemple, avant le « Fly by wire », les premiers dispositifs de protection du domaine de vol avaient été initialement conçus en cohérence avec les commandes de vol, mais sans désengagement automatique *adéquat* du PA en cas d'événements atmosphériques brutaux. De même, le TCAS était, à l'origine, un système *passif* qui n'excluait pas la possibilité de collision avec un autre appareil obéissant à des directives

contradictoires venant du sol. Les nouveaux systèmes simplifient désormais les changements de modes et haussent les niveaux de fonctionnalités.

Plus généralement, l'accumulation d'informations sur les PFD, la diversité des choix de configurations de ND (MFD) et des choix de mode de PA commandés par boutons dédiés, ne sont pas toujours des modèles de cohérence …. Mais on y remédie activement sur les appareils les plus récents.

Dans ce sens, *l'Informatique introduit progressivement une véritable rupture*. Chaque nouvel « instrument de bord » ajouté, d'utilité incontestable, a longtemps constitué une couche supplémentaire d'un « millefeuille » devenant de plus en plus indigeste. En « intégrant » *par logiciel* plusieurs instruments dans une même couche on allège le millefeuille de manière transparente pour son consommateur (le pilote). C'est ce qu'on a opéré en ajoutant au PA la programmation de fonctions de plus en plus nombreuses et sophistiquées, (conjugaison de commandes et amortissement de turbulences, séquencement du plan de vol, protection du domaine de vol, optimisation de consommation…), allant ainsi jusqu'à la conduite automatisée du décollage à l'atterrissage. On peut aller encore plus loin dans l'automatisation informatisée, en introduisant des fonctionnalités *de niveau de plus en plus élevé*, telles que le déroutement automatique suivant la météo, la modification automatique d'approche pour respecter l'horaire, ou la gestion de pannes entièrement automatisée … Il s'agirait là, pour le pilote, d'une rupture fondamentale, (affectant globalement le STA) car on toucherait à l'aspect le plus fondamental de son métier : *être responsable à bord*. C'est un enjeu important des progrès de l'IA dans l'Informatique de demain.

Commandes de vol

Les servomécanismes, simples tabs pour le B707, systèmes hydrauliques pour Comet, Caravelle, et leur suite, ont d'abord permis de piloter les gros avions rapides sans efforts physiques démesurés, en complétant l'effet des compensateurs manuels (trims). Les stabilisations artificielles, basées (maintenant) sur la simulation des équations de Mécanique du vol, rendent maniable un avion difficile à contrôler : les amortisseurs de lacet depuis le B707 [108], la sensation artificielle au manche, et la protection de la structure contre les rafales, ont fait successivement leur apparition.

Les alarmes au décrochage, initiées avec des « stick shaker » et complétées par « stick pusher » (sur les avions dont le décrochage profond « Deep Stall » peut être difficile à récupérer), ont été étendues aux *protections automatiques*. Depuis l'A320, elles sécurisent l'avion contre les excursions dangereuses hors du domaine de vol, à l'approche du décrochage (Stall, buffeting) ainsi que des vitesses supérieures dangereuses pour la structure (VMO, VNE).

Systèmes anticollision

* E)GPWS ou TAWS **[109] :** à l'origine, ce système d'alerte de proximité sol provoquait des manœuvres évasives inutiles et parfois dangereuses[110]. Le stockage à bord d'informations géographiques précises et le perfectionnement des moyens de localisation (LOC/DME ou GNSS) ont éliminé les alarmes intempestives. L'affichage du terrain apparaît sur le MFD.

Les collisions avec le sol ont disparu de la liste des causes fréquentes d'accidents. Le risque LOC (Loss of Control) est devenu plus fréquent que le risque d'accident CFIT (Controlled Flight Into Terrain) qui correspond à des erreurs d'appréciation sur la situation de l'avion par rapport au sol et aux obstacles proches, (surtout en finale). C'est alors que la complémentarité du commandant de bord et de son copilote doit jouer à plein.

*Le TCAS est un radar secondaire embarqué à portée limitée, avec calculateur d'évitement, moyens d'affichage et d'alerte *impérative*. A la suite de plusieurs collisions, l'OACI a prescrit son installation pour tout avion de plus de 19 passagers. Les transpondeurs Mode C (indication d'altitude)

[108] Innovés en 1944 sur le Me163, aile volante Lippisch, seul chasseur fusée opérationnel !
[109] (Enhanced) Ground Proximity Warning System ou Terrain Alert and Warning System.
[110] ou pire, une perte de confiance des équipages dont certains ont ignoré une alarme, pensant qu'elle était intempestive, et ont percuté le sol.

ou S (sélection d'identification et autres données) sont également obligatoires. Depuis ces prescriptions, les collisions intervenues n'ont mis en cause que des utilisations du TCAS ou du transpondeur non conforme aux règlements.

Le TCAS peut être utilisé en tant que dispositif *actif* couplé au PA, disponible depuis 2008 sur les avions équipés, en commençant par l'A380. Ce dispositif permet de réduire les manœuvres d'évitement excessives parfois rencontrées depuis l'entrée en service du TCAS.

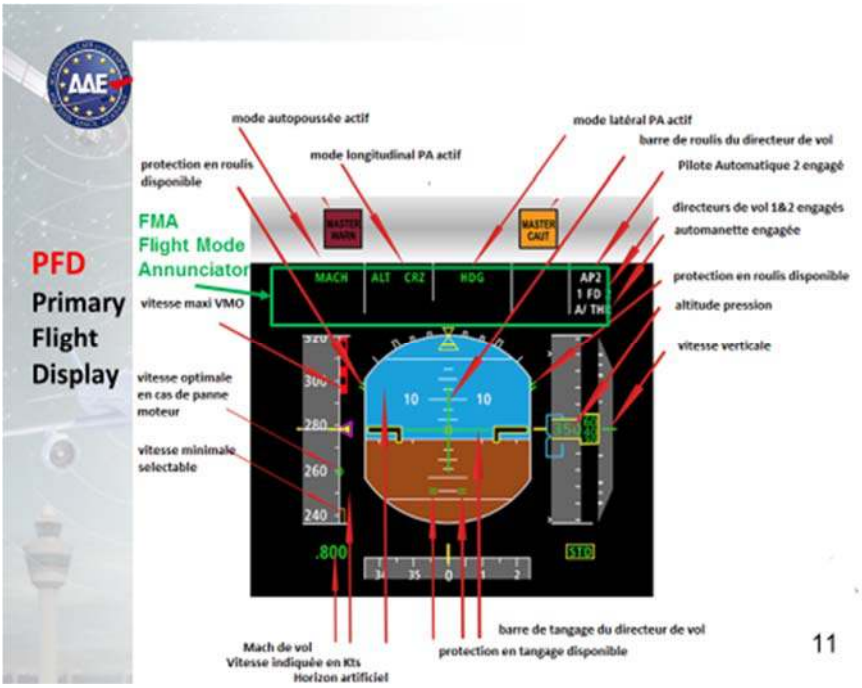
En résumé, rappelons que la tendance à l'intégration d'automatismes interconnectés au moyen de calculateurs à fonctions multiples se confirme de plus en plus. Il en résulte une transparence accrue vis-à-vis de l'opérateur, mais aussi une plus grande complexité des automatismes principaux, et en particulier du PA.

Annexe 8 : Glass cockpit

AIRBUS A310

AIRBUS A380

En face du commandant de bord et du co-pilote, un PFD (Primary Flight Display) affiche de part et d'autre de l'horizon artificiel, sous forme de réglettes verticales défilantes : à gauche la vitesse avec ses consignes et sa flèche de tendance (Speed Trend), à droite l'altitude avec la vitesse verticale Vz, et l'ILS vertical. L'avion est figuré au centre de l'horizon, avec les barres du directeur de vol FD, et divers symboles mobiles : en haut, inclinaison et indicateur de dérapage (modernisant la bille-aiguille), au centre indications d'attitude longitudinale et latérale, en bas indicateurs de cap et de suivi d'ILS latéral. La pression barométrique au sol, la température, les données de navigation (indicatifs et fréquences VOR, DME …), et surtout, dans la partie haute, les *indications de mode du FMA* (Flight Mode Annunciator) sont affichées sur le PFD. Au total, près d'une trentaine d'indications à saisir d'un coup d'œil !



PFD en haut, T basique ci-dessous

* Le plus souvent, (à droite du PFD pour le Commandant, à gauche pour le copilote), un autre écran, le MFD ou ND (Navigation Display) présente au choix la rose des caps, les relèvements ADF ou

VOR ou les indications cartographiques (avec des échelles et des détails variables). Sur la plupart d'entre elles, la route programmée et la route réelle sont figurées, avec les indications de NAV, de zones, d'aéroports, de balises … En approche finale, l'image du terrain s'inscrit, et en route les données du radar météo sont affichables. Une figuration verticale du relief est également disponible.

* Dans la plupart des avions légers ou d'affaires, les interfaces de contrôles moteurs figurent sous forme de réglettes ou de mini-cadrans sur un écran séparé, ou sur une partie du MFD-ND. Sur les avions de ligne dont l'ensemble propulsif est géré par FADEC, un système complet de surveillance et de détection d'anomalies a été développé (sur la console centrale) par Boeing (EICAS) et Airbus (ECAM = EICAS + conseils de gestion de dépannage), joints à un système élaboré de la gestion du carburant, des énergies électriques, hydrauliques, pneumatiques, ainsi que des APU (Auxiliary Power Unit) et autres systèmes auxiliaires.

* L'ensemble des *commandes système* de l'avion, comprenant la gestion de la cabine et des soutes, est régi par des calculateurs dont la mise en œuvre et l'ergonomie sont progressivement simplifiées et améliorées. Les écrans spécialisés et les claviers sont placés entre les deux pilotes et accessibles depuis un troisième siège arrière, (c'était celui du mécanicien). L'utilisation d'écrans tactiles et de souris étant peu ergonomique (à bout de bras) et peu fiable (en turbulences), des boutons spéciaux (KCCU keyboard cursor control unit) facilitent la programmation appliquée à l'ensemble de l'EFIS (Electronic Flight Instrument System)[111].

* Au-dessus des pilotes un vaste tableau de commandes et voyants occupe le plafond pour les contrôles complémentaires. Rappelons que la réduction historique de l'équipage de 5 à 2 intervenants a rendu nécessaire la concentration, auprès des deux pilotes (qui doivent rester sur leur siège), de tous les instruments et de toutes les commandes permettant de remplacer mécanicien, navigateur, et opérateur radio.

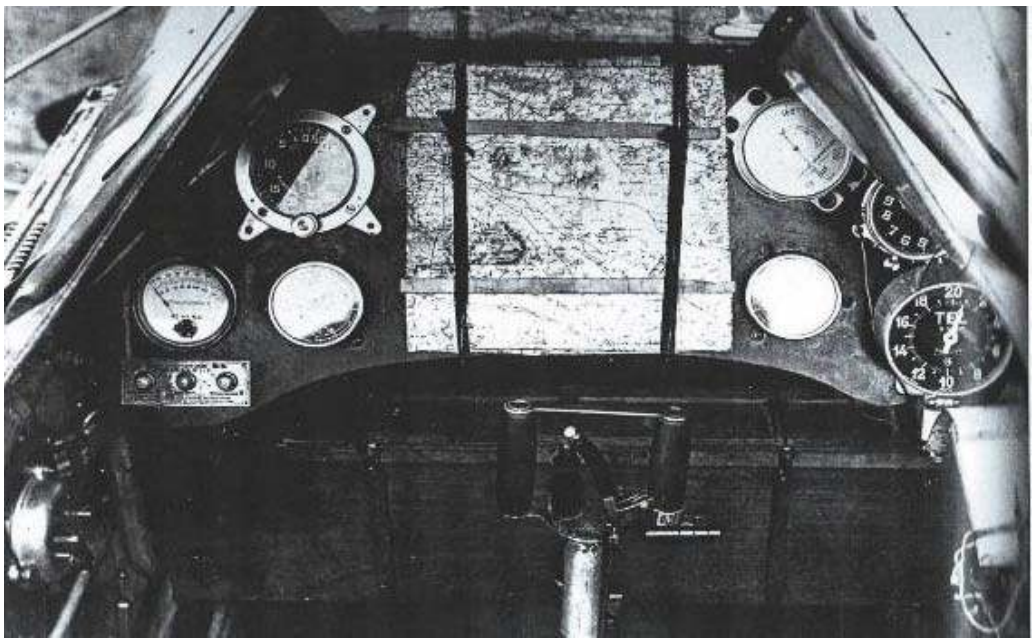
De nombreuses commandes s'effectuent à l'aide de boutons poussoirs intelligents et éclairés : quand tout va bien, ces boutons sont éteints (concept « Dark Cockpit ») ; quand une panne survient, le bouton s'allume en ambre, indiquant naturellement qu'il faut l'actionner suivant la procédure recommandée.

Annexe 9 : Les hommes et leurs avions, hier et aujourd'hui

*Jusqu'aux années 30, *motoristes et aérodynamiciens ont suffi* pour créer des machines à la fois *servies et dirigées* par des *aviateurs* passionnés, généralement doués physiquement, toujours résolus et endurants, souvent habiles et audacieux, plus rarement techniciens, ingénieurs … ou écrivains. Leur compétence et leur expérience les menaient à « faire corps » avec leur zinc, dont le pilotage était parfois athlétique, et l'équipement de bord rudimentaire dans les débuts de l'aviation commerciale (voir ci-dessous le tableau de bord d'un Bréguet 14 dont le manche à deux poignées pour pilote musclé préfigurait le manche à volant qu'on tient à deux mains).

En plus de la fatigue physique, l'impression de solitude dans le ciel était éprouvante pour les premiers pilotes professionnels non équipés de phonie, (cf. la littérature inspirée par l'Aéropostale !).

[111] Le Boeing 777, les Airbus à partir de l'A380 ont un désignateur tactile du type « souris » dont l'ergonomie est adaptée à l'environnement du cockpit ; Gulfstream introduit des écrans tactiles sur ses derniers modèles.



Bréguet 14

*Toutefois, l'électronique était née au début du vingtième siècle, avec la radiotélégraphie dont l'expérimentation en Aéronautique a été très rapide (1912) et, dans ses débuts, à la remorque (si l'on peut dire) de la navigation maritime (ondes longues et moyennes). Mais les premières « lignes aériennes » n'en firent qu'un usage timide avant les années 30.

La deuxième guerre mondiale a alourdi les avions pour leur faire porter des bombes en attendant des passagers, et a allégé les équipements radio (de la HF à tubes à la VHF et UHF transistorisées), tout en augmentant les performances. Chaque invention nouvelle a été attendue et immédiatement expérimentée en vol, jusqu'à nos dernières décennies où le nombre, la complexité et le rythme des innovations dépassent désormais les possibilités de les exploiter rapidement avec sécurité.

L'avionique joue maintenant un rôle primordial, les TIC et la robotique viennent en transformer la nature en profondeur.

*Est-on sur le point d'assister à un renversement de situation ? Jusqu'ici, le rôle majeur des pilotes modernes a été de *gérer en pleine responsabilité* des vols largement automatisés, mais on commence à voir des automatismes plus experts que les pilotes et réticents à leur laisser prendre les commandes en cas de danger, c'est déjà le cas pour des avions dotés de protections raffinées du domaine de vol.

Les automatismes deviennent « intelligents », leurs progrès sont inspirés par l'IA. Par voie logicielle, ils savent détecter, et même réparer leurs dysfonctionnements. *Le navigateur et le mécanicien d'antan réapparaissent ainsi sous forme d'automates*, dans des avions dont le plan de vol peut être téléchargé et (presque totalement) exécuté sans qu'on ait à toucher aux commandes (comme dans les voitures qu'on nous promet pour demain). On sent venir le drone …

Certains en viennent donc à s'interroger, pour le futur, sur l'utilité des pilotes, seuls humains présents dans les cockpits, héritiers incertains des qualités d'anciens dont on glorifiait naguère les exploits. *Peut-on encore affirmer qu'un équipage actuel domine ou comprend sa machine ? Et d'ailleurs, est-ce indispensable ?*

On a tendance à répondre « oui » à la seconde question en vertu du Principe de précaution[112], et d'un « passé aéronautique » qui a fait ses preuves dans un Système « STA » qu'on ne saurait bouleverser à la légère.

**Avant de remplacer un homme par un automatisme en vue d'augmenter la sécurité, il faut être très prudent, et s'assurer que les systèmes mettant en œuvre cet automatisme disposent de toutes les informations nécessaires pour l'activer, avec une fiabilité suffisante (obtenue grâce aux redondances et accommodations de pannes adéquates).*

Une vérification minutieuse (et manuelle) qui est traditionnelle chez les navigants, grands pratiquants de « check-lists » depuis un siècle, contribue aussi à rapprocher psychiquement l'homme du matériel dont il est responsable. Mais un avion de ligne est bien plus compliqué et austère qu'un vieil avion de tourisme où c'était un plaisir de réciter simplement « ACHEVER » !

On peut se demander quel rapport affectif (qui est « le maître » à bord ?) peut encore inspirer à ses occupants un cockpit de jet moderne, en comparaison de ce que ressentaient les aviateurs d'autrefois [113]? Cette question doit sans doute figurer parmi les « dommages collatéraux » que pourrait créer un développement irréfléchi de « trop » d'automatisation.

*On peut surtout, plus pragmatiquement, s'interroger sur le degré de parallélisme qui existe entre le fonctionnement d'une machine pilotée humainement et celui d'une machine autonome, et en particulier sur le sens anthropomorphe de ce qu'on appelle « décision ». N'oublions pas qu'une machine ne décide généralement pas, ou le fait (jusqu'à présent) seulement dans un cadre déterministe préprogrammé. En revanche la décision apanage de l'humain intervient plus ou moins spontanément dans le cadre d'une « rationalité limitée », la cognition étant à confronter avec des parts d'ignorance (pressentie) et d'émotion (subie), qu'une machine ne connaît pas (ou pas encore).

Si on *veut* réaliser des avions autonomes ce ne sera probablement pas en cherchant à « remplacer » l'homme par des automates, mais en imaginant de A à Z une robotisation non « humanoïde », une machine à haut degré d'intelligence *artificielle* nettement différente de l'aéronef d'aujourd'hui. ***« Remplacer » l'homme par un automate n'a pas le même sens que créer une nouvelle machine sans opérateur à bord* : il faut savoir si on veut réaliser des « *avions* automatiques » ou des « *pilotes* automatiques ». C'est à ce niveau qu'on peut envisager des ruptures profondes, informaticiens et cogniticiens semblent s'y intéresser en commun avec les ingénieurs aéronautiques ….**

Annexe 10 : Enjeux et défis de l'automatisation

Par Alain Joselzon Membre de l'AAE

La démarche vers une aviation plus automatique, interconnectée, vise à la fois une plus grande efficacité et, comme on l'a déjà signalé, un niveau de sécurité accru dans des proportions significatives (cf. facteur 4 identifié dans le dossier « Comment volerons-nous en 2050 ? » lors de la phase précédente des travaux de la Commission Prospective de l'AAE).

La question de la sécurité est primordiale et déterminante dans la démarche d'extension de l'automatisation, et, au-delà, dans les orientations générales qui seront prises pour la conception des

[112] mais ce Principe n'est pas applicable à l'Aéronautique, soumise à une règlementation basée sur les probabilités d'accident.

[113] Un pilote moderne peut-il avoir des sentiments qui pourraient l'écarter d'une neutralité vigilante, le rendre plus accessible au stress ou à la rêverie ? Les designers de tableaux de bord d'automobiles en sont conscients.

aéronefs et du transport aérien du futur. Les tendances révélées par les statistiques récentes portant sur les avions de troisième et quatrième génération sont encourageantes, mais il demeure essentiel de s'assurer que les évolutions envisagées soient compatibles avec les objectifs de sécurité et puissent les soutenir.

Une réflexion et des analyses approfondies sont nécessaires, notamment sur :

*l'évaluation et la prise en compte des risques inhérents à l'introduction de nouveaux systèmes ;

*les besoins, conditions, exigences, opportunités et risques mis en jeu dans les choix entre :

- d'une part, une approche pas à pas pragmatique, suivant le « rythme naturel » de développement des technologies, des aéronefs, de la gestion du trafic, des aéroports et de leurs accès, de la réglementation, du transport aérien en général,

- d'autre part, une approche plus ambitieuse à long terme, avec une remise à plat, visant une optimisation globale,

- ou l'adoption d'une démarche tentant de concilier et associer les deux approches ;

*les implications des différentes démarches possibles en matière de recherche, de ressources humaines, infrastructurelles et financières, et en termes d'aspects organisationnels, structurels et économiques ;

*les exigences d'intégration des nouveaux automatismes, incluant les aspects d'interface homme-machine, avec à la clé des programmes de gestion de la sécurité prévoyant d'intégrer les analyses de sécurité indispensables prenant en compte le partage des responsabilités selon les différents cas de pilotage (un ou deux pilotes en vol, un en vol/un au sol, drones...) ;

*les exigences en matière de formation des équipages et des personnels au sol ;

*les exigences de préservation des rôles d'architecte-intégrateur et de « superviseur de la conception » des aéronefs, afin de protéger et renforcer une capacité de vision synthétique dans un monde technique de plus en plus spécialisé et complexe ;

*les aspects réglementaires ;

*les besoins en matière de méthodologies (incluant conception-essais-validation-vérification).

Les livrets du présent Rapport aborderont un certain nombre d'aspects qui sont apparus essentiels à la CAC, sans toutefois pouvoir prétendre traiter ces multiples sujets de façon exhaustive, compte tenu de leur ampleur et de leurs ramifications.

Glossaire des abréviations

ACARS	Aircraft Communication Adressing & Reporting System
ACAS	Airborne Collision Avoidance System
ADS/(B ou C)	Automatic Dependant Surveillance (/Broadcasting ou /Contract)
AFCS	Automatic Flight Control System
AHRS	Attitude Heading Reference System
AP	Auto Pilot (ou PA : Pilote automatique)
APU	Auxiliary Power Unit
ATM	Air Trafic Management
CAS	Calibrated Airspeed
CCO	Centre de contrôle opérationnel
CDU	Central Display Unit
CPDLC	Controller-Pilot Data Link Communication
CRM	Crew (ou Cockpit) Resource Management
TEM	Threat and Error Management
DME	Distance Measuring Equipment

ECAM	Electronic Centralized Aircraft Monitoring (Airbus)
EICAS	Engine Indicating & Crew Alerting System (Boeing)
EFIS	Electronic Flight Instrument System
EGPWS	Enhanced Ground Proximity Warning System
FADEC	Full Authority Engine Control
FD	Flight Director
FFCC	Forward-Facing Crew Cockpit
FMA	Flight Modes Annunciator
FMC	Flight Management Computer
FMS	Flight Management System
GNSS	Global Navigation Satellite System
HUD	Head Up Display
ILS	Instrument Landing System
INS	Inertial Navigation System
KCCU	Keyboard Cursor Control Unit
LOC	Localizer (HF)
MCP	Mode Control Panel
MFD	Multiple Functions Display
ND	Navigation Display
NDB	Non-Directional Beacon
PFD	Primary Flight Display
TCAS	Traffic Collision Avoidance System
RNP	Required Navigation Performance
SMGCS	Surface Movement Guidance & Control System (Aéroports)
SSR	Système Surveillance Radar Secondaire Pour Transpondeurs mode A (indicatif), C (A+altitude), S (C+ …)
TAS	True Airspeed
VD	Vertical Display
VOR	VHF Omnidirectional Range

Livret 3 : La TRANSITION CYBERNETIQUE du TRANSPORT AERIEN de PASSAGERS : *Une APPROCHE THEORIQUE ELEMENTAIRE et PHILOSOPHIQUE*

Jean-Claude RIPOLL (Membre de l'AAE)

Résumé

L'objet de l'essai est de développer une approche méthodique de l'automatisation de la conduite du vol proprement dit, *id est* entre l'alignement et la libération de la piste. La notion de pilotage est élevée au niveau des décisions tactiques puis stratégiques qui gouvernent *in fine* les commandes appliquées aux organes de conduite de l'avion. Les modes de pilotage sont alors explicités et hiérarchisés, et s'en déduit une architecture stricte du système d'automatisation. La notion d'équipage est étendue à l'ensemble des intervenants, y compris les automatismes et le sol. À un terme lointain l'avion tout automatique est un robot capable d'effectuer toutes les tâches récurrentes d'une mission complète, mais reste sous le contrôle d'un opérateur humain embarqué. Celui-ci doit gérer les situations non programmées (imprévues), et dispose pour cela de commandes adaptées. Cette configuration, espérée après plusieurs décennies est l'aboutissement d'une « transition cybernétique ». Il est préconisé de lancer pour cela un vaste programme de développement et de démonstrateurs d'automatismes aboutissant à ce robot.

Sur la base d'une classification hiérarchisée de modes de conduite du vol, on définit les automatismes de complexité et de puissance croissante. Au plus bas niveau (noté 1) l'opérateur humain actionne des servomécanismes. Au niveau 2 il agit au travers de lois de commandes de vol. A partir de ce niveau l'opérateur commande des résultats. Dans le mode de niveau 3 des automates pilotent des trajectoires, au niveau du mode 4 les robots délégués pilotent des manœuvres, au niveau 5 les robots substituts accomplissent des missions. Ces machines doivent être considérées comme partie de l'équipage de conduite du vol, équipage qui s'étend déjà au sol, extension qui s'accentuera.

La présence à bord d'un responsable humain reste un principe de base de l'analyse, même si le robot est capable d'effectuer toute la mission. Ce principe résulte de considérations globales, les passagers n'acceptant pas l'absence d'un représentant de la Compagnie partageant leur sort, et toute machine programmée pouvant être confrontée à un imprévu (situation non programmée).

Les automatismes doivent prendre place strictement dans une hiérarchie des modes de conduite du vol (définis plus haut) sous peine de rendre incompréhensible le comportement de la machine.

Les processus de conduite sont décomposés sur la base d'une « boucle » universelle d'étapes automatisables à l'exception de la décision dans le doute, propre à l'humain.

La présentation de l'état généralisé de l'appareil doit faire clairement apparaître le mode en fonction, et les commandes correspondantes doivent être en cohérence.

Le rôle des opérateurs humains revient à attribuer les tâches convenant aux machines, récurrentes et/ou exigeant rapidité et précision d'exécution : les commandes traditionnelles (manche, manettes, etc.) disparaissent, et les compétences de l'opérateur humain embarqué évoluent.

L'implémentation de dispositifs devant éviter ou compenser les dysfonctionnements fait partie de l'automatisation.

La gestion des crises imprévues (situation non programmée) reste le domaine de l'humain, à qui les moyens adéquats doivent être fournis par la conception des automatismes de bas niveau réputés fiables. Le niveau minimal prescrit, de fiabilité « totale », est celui de la commande et de l'exécution de « trajectoires » ; les combinaisons d'évolutions (modifications du vecteur-vitesse) relèvent de calculs de mécanique du vol par l'automate, au-delà des capacités humaines. L'avion tout automatique sera conçu comme un « drone » autonome, opérant sous la surveillance d'un « contrôleur » humain embarqué. En conséquence pour parer aux crises le contrôleur sera muni d'une commande de trajectoire.

Les recommandations visent à un terme lointain une transition cybernétique du transport aérien, basée sur des appareils très autonomes, associés à des systèmes au sol eux-mêmes évolués vers une très large automatisation. La transition consiste, après avoir standardisé les lois de pilotage, à standardiser

successivement les modes tels que définis. La validation (et certification) des robots substituts pourrait résulter d'une longue période de mise en œuvre sous le contrôle d'un équipage classique (« double commande » d'école). La compétence de l'opérateur humain embarqué s'éloigne de l'habileté à commander des évolutions pour se concentrer sur les hauts niveaux d'analyse et de décision.

Compte tenu de l'inertie du système la durée de transition est de plusieurs décennies.

INTRODUCTION

Préambule

L'ambition d'une « théorie » est ici la recherche d'une certaine logique dans les actes d'automatisation. Cette logique ne s'appuie pas sur une démarche simplificatrice telle que « puisque le facteur humain est responsable désormais d'une grande partie des accidents, remplaçons l'humain par la machine ». Elle ne s'appuie non plus sur une démarche purement économique visant à diminuer le nombre de salariés et éliminer les aléas sociaux. Cela n'élimine pas l'appréciation des aspects économiques positifs ou négatifs, sans toutefois chercher une quantification.

L'analyse essaie d'introduire une structure permettant de classer les différents « automatismes » ou automates mis en œuvre ou proposés, en vue de les articuler de façon optimale, notamment du point de vue de la sécurité.

L'énoncé théorique ne prétend pas disqualifier les réalisations en usage, mais seulement proposer un cadre dans lequel ces réalisations viennent se placer en faisant apparaître des positions qui appelleront soit des requalifications, soit des compléments ; ces évolutions ne seront pas nécessairement explicitées, le but de l'essai n'étant pas de critiquer ni de formuler des cahiers des charges. Il serait toutefois intéressant de comparer les réalisations en usage avec les concepts de l'approche ici tentée.

L'automatisation de la conduite du vol permet d'exploiter d'autres évolutions, et indirectement d'obtenir des gains économiques, par exemple les trajectoires de haute précision réduisent les pertes opérationnelles.

L'apparente augmentation de sécurité dans le transfert de certaines tâches de l'opérateur humain à des automates doit être examinée avec soin.

Vision prospective d'ensemble

L'automatisation progresse partout. Dans le système de transport aérien c'est la conduite du vol qui entraîne le plus vivement cette tendance. Il en résulte une remise en cause des paradigmes de la conception, de l'utilisation, de la certification, et par suite de la formation des personnels.

L'automatisation s'étendra progressivement à tous les domaines du transport aérien, conduisant à une transition cybernétique. Le présent essai se limite à la conduite du vol proprement dit, c'est-à-dire de l'alignement à l'évacuation de la piste. L'automatisation très poussée sinon totale de cette phase ne peut se concevoir sans une automatisation plus ou moins étendue de l'ensemble des opérations menées par les divers acteurs au sol. Les développements présentés à propos de la conduite du vol font l'hypothèse que les autres domaines évolueront également, de façon à permettre cette automatisation.

Le transport aérien est un système de systèmes complexes, marqué par une forte inertie. Celle-ci résulte de l'importance des investissements en cause, de la durée de vie de chaque appareil, de la longueur des séries faisant suite à des durées de développement conséquentes, de la prudence imposée par les objectifs de sécurité, traduite notamment par les procédures de certification. Cette inertie affecte le processus d'automatisation, assurant la poursuite de son expansion et mesurant son rythme relativement lent mais régulier depuis le saut technique des commandes numériques. Cette inertie du système est bien connue ; autant elle justifie de placer à un horizon voisin de 2050 l'achèvement de la transition, autant elle justifie

de la considérer comme inéluctable, dans le contexte sociotechnique de l'époque (« Big Data », « cloud », IoT, objets et populations connectés en permanence). L'interconnexion de tous les acteurs à tous les niveaux s'intensifiera avec les réseaux terrestres et spatiaux (méga constellations).

Au stade actuel on ne peut contester l'effet positif de l'automatisation sur l'économie générale du système, et l'évolution du contexte sociétal ne peut qu'en favoriser la globalisation à l'ensemble des acteurs. C'est la conduite du vol qui est en pointe dans le domaine, par le caractère critique des automatismes mis en œuvre, alors que les divers organes au sol utilisent essentiellement des supports informatiques.

L'expansion considérable du transport aérien résulte naturellement de la prééminence du paradigme de la mobilité, mais a bénéficié des progrès techniques qui en ont réduit le coût d'usage, grâce aux performances aérothermodynamiques, tout en accroissant la sécurité matrice de la confiance d'un public étendu. Dans ce cadre la concurrence entre les constructeurs se joue assez largement sur l'équipement opérationnel destiné à réduire les coûts et aléas de l'exploitation, grâce à l'automatisation. Il en résulte une multiplication des automatismes implantés à mesure de leur certification à partir de l'ingéniosité des concepteurs.

L'essai ici présenté n'a pas pour but de formuler une « remise à plat » de l'automatisation telle qu'en service, au prétexte qu'elle serait le fruit d'une implémentation d'opportunité, et par conséquent d'avancer pour la suite des développements en automatisation une nouvelle méthode qui serait supérieure. L'objet est plutôt d'essayer de discerner les lignes directrices sous-jacentes et peu ou pas explicitées, et de proposer que celles ainsi identifiées contribuent à structurer les programmes de travaux à venir, encore considérables, nécessaires pour aboutir à un stade d'automatisation du niveau maximal admissible.

Dans une approche prospective avec 2050 comme horizon, il faut intégrer la vision d'un contexte qui rend l'automatisation de la conduite du vol, sans doute presque totale, pratiquement inéluctable. D'une part les progrès techniques des équipements, d'autre part les progrès scientifiques des logiciels permettront l'implémentation d'automatismes extrêmement sûrs, en même temps que la prolifération des aéronefs de toutes sortes, parmi lesquels les drones autonomes et les p-planes (avions personnels) semi-automatiques, imposera une grande précision de conduite du vol et le respect absolu d'une ségrégation complexe. Parallèlement les réseaux d'interconnexion permanente et universelle des acteurs et des objets assureront la disponibilité des informations nécessaires, à jour et garanties. Les aéronefs évolueront dans un espace aérien virtuel (définition dématérialisée), segmenté par des cloisons numériquement définies, délimitant des zones ouvertes de façon dynamique aux divers types d'exploitation. Les frontières seront détectées localement par les automatismes embarqués, ce qui conduira à leur respect. Tous les aéronefs significatifs seront équipés de cette façon.

La problématique est donc d'effectuer une transition maîtrisée, depuis le système actuel pragmatiquement développé dans un cadre réglementaire stabilisé, vers un système cybernétique qui reste à spécifier en détails, et dont la certification demandera des innovations. Le présent essai doit être compris comme une contribution à cette démarche.

On admet que le tableau global du système de transport aérien restera sensiblement le même qu'actuellement. Dans le cadre d'une réglementation (qui englobe tout), sous la constante recherche de sécurité, avec des contraintes économiques, trois acteurs majeurs « opèrent » pour chaque vol; L'équipage de bord (au sens usuel) est directement face aux « intérêts » des passagers: Le contrôle de la circulation ATM/CTA, ensemble d'un système complexe international, représente (au moins en principe) l'intérêt général: La compagnie (entreprise contractante), représentée par son centre opérationnel, le CCO, a le souci des intérêts des entrepreneurs (sans doute sans oublier la satisfaction du client).

Il n'y aura pas de « big bang » du CTA. A tout instant les règles de l'air seront les mêmes pour tous les aéronefs qui devront être capables de s'y plier. L'automatisation de l'avion proprement dite n'intervient pas, tous les aéronefs devant suivre les consignes du CTA, ou plus généralement respecter un « contrat de plan de vol » accepté par l'ensemble des acteurs, sous l'arbitrage du CTA. L'introduction,

en cours, de drones dans le trafic civil implique l'unicité des règles. Evolution notable, il est possible qu'à l'avenir les contrôleurs aériens suivent un même vol sur tout le trajet (la trajectoire au sens SESAR, ici la mission), à l'exception des zones terminales, au lieu de se cantonner à un secteur géographique ; la notion d'équipage étendu y conduit.

Dans une vision prospective à l'horizon 2050 les changements d'organisation industrielle des entreprises de transport aérien ne changeront pas fondamentalement le rôle de l'entité qu'on appellera le CCO, mais pourrait en augmenter encore l'autorité avec l'expansion des flottes et dessertes, et l'interconnexion planétaire promise par les projets spatiaux ou terrestres.

Principes

Le présent essai tente de retrouver dans le foisonnement des évolutions à base d'automatismes une structure unique qui à la fois justifie certaines réalisations et de nombreux travaux en cours, et conduit à recommander une orientation pour leur poursuite ou intensification, ainsi que le lancement d'autres recherches et développements. Les prédicats restent très principalement attachés à la conduite du vol, mais inévitablement tout le contexte s'introduit par endroits, et il est nécessaire d'anticiper l'inclusion méthodique des concepts dans le système complet.

Quelques principes généraux sont respectés

Pilote et équipage

Il y a nécessairement quelque part un « pilote » qui prend les décisions nécessaires. En effet il reste toujours, au niveau adéquat, un décideur qui doit lancer l'activité de toute machine (robot, automate, calculateur, régulation), soit directement soit par l'intermédiaire d'un programme d'ordre supérieur.

Il y a toujours un pilote……au sein d'un équipage. En fait l'équipage complet d'un avion comporte, dès à présent, une ou plusieurs parties au sol, permanentes ou temporaires, et cela s'accentuera. Les automatismes font intégralement partie de l'équipage. Il en résulte que les interfaces homme-machine relèvent des procédures de gestion de l'équipage (CRM, CDM).

Aussi autonome qu'il soit, un appareil (habité ou non) n'est jamais (normalement) laissé sans surveillance, ce surveillant ou « contrôleur ultime » peut modifier la mission. La qualification de ce contrôleur peut largement varier selon ce qu'on en attend ; éventuellement une qualification de pilote de type, au sens classique actuel, peut apparaître nécessaire. Une configuration classique est celle du pilote à distance des drones militaires (RPAS) ; un examen plus attentif montre qu'il s'agit en fait de guidage (assignation de trajectoires et de buts, niveaux 3 et 4 selon l'analyse du § 2.4 ci-après).

Automatismes

De façon implicite, la première fonction de tout automatisme est de contribuer à l'exécution de la mission, avec amélioration de la performance globale du système. A cette fonction s'ajoutent de façon opportuniste ou systématique des fonctions de fiabilisation (surveillance d'état, limitations de charges) et de sécurité proprement dite (évitement de trajectoires dangereuses ou fatales), voire de réparation ou de sauvegarde en régime dégradé. Les automatismes sont classiquement multipliés en redondances, le remplacement de l'un par l'autre étant aussi automatique.

Néanmoins il faut admettre qu'il y aura toujours des cas de figure où l'automatisme deviendra incapable de poursuivre la tâche en cours, et devra être remplacé par un opérateur humain. Des dispositions doivent rendre cette « reprise en mains » aussi facile et efficace que possible. Cette spécification conduit au concept d'un régime « par défaut » des automatismes, assurant une configuration de vol minimaliste.

Relation humain-machine

La « décision » au sens vrai n'existe qu'en cas de doute, c'est pourquoi elle relève uniquement de l'humain. Si les éléments disponibles peuvent être traités par un algorithme qui donne un résultat certain, alors la « décision » est « automatique ». Les données incertaines ou incomplètes peuvent être traitées par un « système expert » qui associera des probabilités à plusieurs réponses, soumises donc à un choix décisif.

Dès 1951 (après Fitts) on aurait pu écrire : **« If the machine knows better what is to be done, let the machine do it ».**

Le rôle essentiel de l'humain, dans lequel il doit démontrer sa supériorité, est de juger en cas d'incertitude et de décider ce qui doit alors être fait, répondre à la question implicitement posée par une machine : **« what to do now ? ».**

Cas du transport aérien

De nombreux moyens de transport terrestre sont automatisés et dépourvus de personnel de bord. Cette pratique apparaît au rédacteur comme inacceptable dans le cas du transport aérien de passagers, pour des raisons éthiques, sociétales et juridiques. Fondamentalement le véhicule aérien (au moins dans sa forme actuelle et pour un futur relativement peu éloigné comme 2050) est soumis à des contraintes sur sa capacité à se sustenter (vitesse) sur les lieux de repos (aérodromes), autrement dit n'offre pas en cas de problème la solution évidente d'un arrêt sur place et d'un débarquement. Cette caractéristique exclut immédiatement l'élimination de l'humain, le passager ne pouvant donner sa confiance à autre chose qu'un autre humain, éventuellement au travers de contrats et de lois. Le temps n'est pas proche où le passager sera assez conscient et informé pour accepter de donner sa confiance au travers d'une machine. En conséquence la réflexion s'appuie sur le principe majeur :

il y aura toujours à bord un humain, représentant des entités responsables ayant autorisé, organisé, vendu le service de transport, **habilité à intervenir dans la conduite du vol, et partageant ainsi le sort des passagers.**

Ce principe reste de base pour le transport de passagers, même si à l'avenir un robot devient capable d'effectuer toute la mission. Néanmoins le rôle de ce responsable humain n'est plus le rôle historique. Toute machine programmée pouvant être confrontée à un imprévu (par définition situation non programmée) il revient à cet opérateur de prendre la relève. Les dispositions à prendre pour assurer la permanence de cette capacité, c'est à dire la disponibilité effective de l'opérateur, ou une substitution réputée efficace, sont supposées prises. Elles ne relèvent pas à proprement parler de l'automatisation de la conduite du vol, mais de la conception globale du système, en tenant compte des particularités de l'opérateur humain. La solution classique est le doublonnage à bord, l'intervention d'un automatisme de sécurité intérimaire permet d'attendre la substitution par un opérateur au sol.

Les éléments basiques (« principes ») énoncés ici sous-tendent la suite de l'analyse.

CdB, Captain,…. l'énoncé qualifiant « l'humain » évoque bien entendu le pilote commandant de bord. La tradition en fait l'autorité suprême à bord, premier magistrat du village volant sous tous les aspects. Doit-on conserver la fusion avec la direction technique et opérationnelle du vol ? le rédacteur le pense, sous réserve de délégataires possibles.

AUTOMATISATION DE LA CONDUITE DU VOL

Ce chapitre a pour principal objet l'identification rationnelle des composantes de l'automatisation, et de leurs rapports dans l'exécution du vol.

Définitions

Le vol

Par la suite on considère que le vol proprement dit, objet de la réflexion, commence à l'entrée sur la piste et s'achève à la libération de la piste d'arrivée. De ce fait les phases de roulage au sol, qui font partie du vol au sens commercial, sont exclues. Le roulage au sol pose un problème d'automatisation particulier. La disposition et l'équipement varient d'un aéroport à l'autre, on estime ici qu'il n'est pas possible d'installer à bord un équipement standard capable de tous les cas. Par conséquent on imagine que le taxi sera effectué par un tracteur (ou un traceur si les roues sont motorisées) équipé des moyens locaux de routage automatique, spécialisé sur le terrain, seul l'accouplement sera standard.

Automate, robot.

Ces termes désignent par la suite en fait des logiciels ou programmes de calculateurs. Dans le langage usuel un robot est une machine matérielle effectuant des travaux, selon cette acception c'est l'avion automatique qui est un robot.

Un automate ne fait qu'exécuter un programme sur la base de paramètres qui lui sont notifiés. Le robot est capable de rechercher et d'assimiler à tout instant des informations pertinentes, et de modifier en conséquence le programme à exécuter.

Le robot est capable de traiter l'**inattendu** (situation possible identifiée mais non planifiée pour le vol en cours, justiciable d'un programme incorporé), mais ne peut traiter l'**imprévu**, qui par définition n'a pas été identifié et reste sans programme de traitement.

Pilote, opérateur

Ci-après le terme « pilote » renvoie selon le contexte à deux notions, celle du décideur d'une action de conduite du vol, celle ordinaire du « pilote en fonction » au poste de pilotage de l'avion. Ce dernier peut prendre à tout moment toute décision de conduite, mais généralement exécute les décisions (stratégiques) prises par l'entreprise (CCO), ainsi que les instructions (tactiques) données par le contrôle de circulation, ces entités sont alors le « pilote ». Pendant les phases de guidage-radar le pilote à bord n'a pas le choix des caps et altitudes.

Le terme « opérateur » couvre soit un humain soit un automatisme (de haut niveau) qui agit sur les commandes spécifiques du mode sélectionné pour la conduite du vol (voir§ 2.4). Si sa localisation n'est pas précisée cet opérateur peut être soit embarqué soit au sol (télécommande). Face à un mode très automatisé on utilise le terme opérateur quelle que soit la qualification technique de l'humain.

Analytique du vol

Référentiels

L'aéronef dispose de mesures dans deux référentiels, « air » (pressions, températures, cap) et « sol » (données inertielles, GNSS, balises), le référentiel air étant en mouvement par rapport au sol (« vent »). Ce référentiel ne peut être que local, en raison des mouvements atmosphériques complexes. La question de la dualité des référentiels, air et sol doit être explicitée et réglée. L'objectif (piste d'atterrissage) est sur le sol, alors que les commandes agissent dans l'air. Le « contrat 4 D » n'a de sens que dans le référentiel «sol ». Réciproquement toute phase référencée « sol » doit relever d'un « contrat 4 D ».

Exemple : les sillages se produisent dans le référentiel air, alors que l'approche finale (alignement, libération de la piste, posé) est en référentiel sol. Suivre un trajet sol par des évolutions air demande beaucoup d'habileté : c'est du domaine des automatismes. Exemple : ILS, avec une présentation de la matérialisation du trajet (faisceaux); les automates se contentent d'une description virtuelle et des données GNSS et altimétriques..

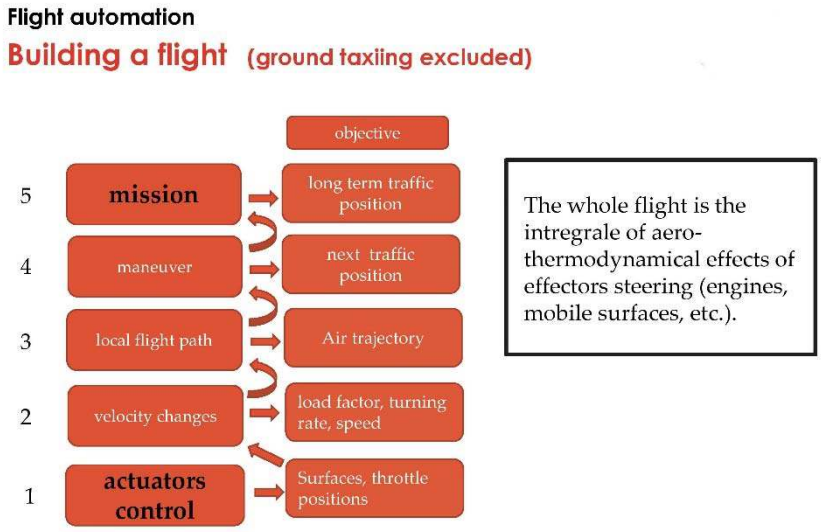
Dynamique du vol

L'avion étant un « solide » (un peu déformable), son déplacement résulte de l'application de forces.

Le **premier stade** de la réalisation du vol est donc la création de forces adéquates qui provoquent une accélération, conformément à la dynamique. Au premier chef il faut créer une force propulsive en consommant un combustible.

Le deuxième stade est l'intégration (au sens mathématique) des accélérations, modifiant le vecteur-vitesse. Le plus évident est la prise de vitesse d'envol sur la piste.

Le troisième stade est alors l'intégration des vitesses, le déplacement, ce qui donne une trajectoire (au sens cinématique). Du fait de l'origine des forces cette trajectoire est définie dans le référentiel « air » (sauf pour les courtes périodes initiale et finale de contact avec le sol).



Le quatrième stade est l'assemblage de trajectoires successives, qui conduisent à un point spatiotemporel bien défini, repéré soit dans le référentiel « air » (exemple type d'une position par rapport à un autre mobile), soit dans le référentiel « sol » (exemple type du point de compte rendu géographique). Cet assemblage est ici qualifié de « manœuvre ».

Le cinquième stade est naturellement l'assemblage de manœuvres, conduisant à atteindre le but du vol, on qualifie ici le parcours complet de « mission ».

Étapes de conduite du vol

Le vol (au sens retenu) est exécuté sous l'autorité d'un décideur, in fine humain si l'on remonte la chaîne des interventions. En admettant même une automatisation extrême permettant l'absence d'un operateur à bord, un décideur a provoqué l'organisation du vol (route, date, vente, contrats adéquats aux services, autorisations, etc.). Selon un enchaînement normalisé, qui peut être automatisé, un appareil est donc prêt à exécuter le vol.

Aux cinq stades d'exécution du vol on fait correspondre cinq modes de conduite. Le principe d'une présence humaine à bord est respecté. Les modes font appel à des niveaux successifs d'automatisation, et se distinguent par la nature de la commande, des ordres donnés par l'opérateur.

Le vol depuis l'entrée sur la piste d'envol jusqu'à l'atterrissage (libération de la piste) est classé « **mission** », définie par les points spatiotemporels de départ et d'arrivée. La réalisation est décomposée en phases de vol successives classées « **manœuvres** » ; le plan de vol au départ décrit une succession prévisionnelle susceptible d'être modifiée selon les circonstances (météo, trafic, incidents, adaptation opérationnelle). Ce scénario initial peut être produit par l'opérateur embarqué (le « pilote » historique) ou par un service plus ou moins automatisé.

Au niveau de la mission, l'automatisation de la conduite du vol consiste à confier à un « **robot** » (classé « **substitut** ») embarqué la tâche d'élaborer puis d'exécuter un plan de vol, en respectant toutes les règles appropriées. En pratique le plan de vol initial sera élaboré d'abord au sol, puis transféré au robot embarqué avec toutes les données caractéristiques de l'appareil et du contexte connu. Pendant le vol, chaque fois que le plan prévu sera remis en cause au vu d'informations obtenues de l'extérieur par le robot, ou à la demande de l'opérateur embarqué, voire en raison d'une anomalie à bord, le robot

proposera plusieurs solutions à choisir par un opérateur. Une fois sélectionnée et définie la manœuvre à exécuter dans l'immédiat, il faut la traduire en une série de trajectoires ; c'est le rôle que l'automatisation attribue à un « **robot délégué** », lequel opérera dans le cadre des contraintes assimilées par le robot substitut, étant entendu que le robot substitut a défini une manœuvre légitime (respectant les zones interdites) et de sécurité (pas de conflits de trafic, évitement des obstacles, etc.). Ces trajectoires qui seront suivies dans le référentiel « air » sont organisées pour aboutir au point spatiotemporel de fin de manœuvre, en tenant compte par conséquent du mouvement relatif attendu entre le référentiel « air » et le référentiel « sol ». Le robot délégué commande l'exécution des trajectoires par des « **automates** », lesquels agissent sur les commandes de vol au travers de calculateurs.

Le pilote historique assure tous les modes ci-dessus décrits. Selon le degré d'automatisation effective de l'appareil le pilote peut choisir le mode qu'il met en œuvre, manipulant les commandes aux niveaux 1 et 2, paramétrant des automates au niveau 3, opérateur de robots aux niveaux 4 et 5.

Identification succincte des modes de conduite

L'analyse détaillée en est développée plus loin dans ce Livret.

Modes « manuels »

Mode 1« par braquages » (forces).

C'est le mode historique qui perdure sur les appareils les plus simples (aviation générale). Le pilote accomplit toutes les étapes en décomposant chacune, en partant de la mission pour en arriver à son action sur les commandes. Il garde en mémoire (largement sur des supports externes pour les détails) les objectifs poursuivis et les éléments déterminants du contexte, et les met à jour. Eventuellement interviennent des automatismes intégrés aux mécanismes (servocommandes, régulateur du moteur), sans changer la nature des tâches. D'autres automatismes sont « oubliés » du fait de leur intégration, comme l'amortisseur de lacet ou le régulateur de freinage.

Mode 2 « par évolutions » (accélérations).

C'est le mode dit « manuel » devenu classique, le pilote n'attaque pas directement les gouvernes mais au travers de « lois de commande » mises en œuvre par des calculateurs. Compte tenu de la complexité et de la sensibilité des moteurs le calculateur associé (FADEC) est très sophistiqué.

Modes automatisés

En tant que machines programmées les automatismes n'agissent pas en dehors de leurs algorithmes (pas d'initiative), mais en revanche exigent de recevoir toutes les données et instructions nécessaires à un fonctionnement sur, correspondant à un mode bien identifié.

Mode 3 « par trajectoire locale – air » (vitesse).

L'opérateur n'agit plus sur les commandes mais indique à un automate les paramètres de vol (vecteur vitesse en fonction du temps et de la position) à obtenir (hodographe commandé) par actions de l'automate sur les commandes (y compris le FADEC), ces actions sont calculées avec précision par l'automate, en tenant compte de l'ambiance et de l'état de la machine (masse, centrage, etc.), en fait par exploitation d'une modélisation de l'avion.

Pratique actuelle courante : dans le cadre d'un « régime » correspondant à l'exigence énergétique du moment, l'automate ajuste la poussée. A noter : l'indication « manuelle » du régime moteur fait donc partie de l'ordre donné à l'automate, et celui-ci doit exiger une indication cohérente avec l'hodographe. L'automatisation telle qu'elle est ici analysée comprend que l'automate détermine le régime à partir de l'hodographe, sans intervention directe sur une commande spécifique au moteur. Dans le cas extrême de perte de poussée l'automate n'acceptera qu'un hodographe de descente à une incidence optimale. La tradition a donné aux propulseurs une position spécifique, ils doivent être intégrés dans le pilotage comme générateurs de forces.

Mode 4 « par manœuvres » (parcours, trajet).

L'opérateur indique à un robot (qualifié ici de « délégué ») un objectif spatiotemporel à atteindre dans l'un des référentiels air ou sol, sous certaines contraintes. Le robot élabore et propose la trajectoire à réaliser. L'opérateur commande la réalisation et le robot commande les automates. Ou bien l'opérateur modifie les contraintes pour obtenir une nouvelle proposition avant réalisation.

Mode 5 « par mission ».

Il s'agit de l'extension du mode précédent à l'ensemble de la mission. L'opérateur indique à un robot (ici qualifié de substitut) l'objectif final du vol. Le robot en déduit les manœuvres successives nécessaires et les commande aux robots délégués. Le processus de proposition et de choix est le même.

Commentaire immédiat

Aux niveaux supérieurs l'opérateur embarqué n'intervient pas dans l'exécution, c'est le « pilote automatique » qui travaille, sous surveillance (monitoring). Une anomalie (gravité à définir...) oblige (peut obliger, pourrait ne pas obliger) à ce qu'il est convenu d'appeler « reprise en mains », ce qui renvoie à l'habileté manuelle, alors qu'il s'agit d'une « reprise en cerveau ». Or la reprise intellectuelle (prise de conscience, assimilation de la situation, interprétation) est nettement plus longue qu'une reprise réellement manuelle (mémoire procédurale), plus instinctive. En conséquence :

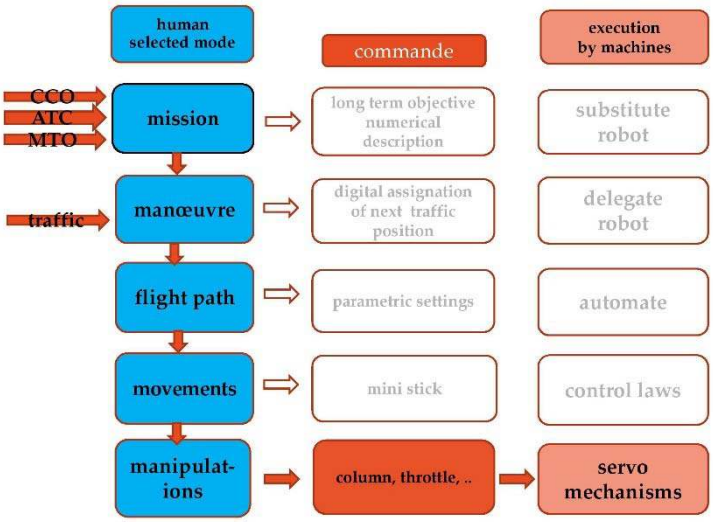
L'abandon de poste par le pilote automatique (robot ou automate) ne doit exiger, ni actions physiques anormales, ni éclair d'intelligence supérieure de la part de l'opérateur humain.

Ce principe est indépendant de la localisation de l'opérateur. La descente de niveau doit donc être progressive et signalée avec clarté. Réciproquement la conduite humaine ne doit pas empêcher le recours (quasi) instantané à l'automate ou au robot. Pour permettre cette reprise de contrôle il est nécessaire que le niveau atteint reste en fonction un certain temps, plus exactement maintienne l'objectif proche (passage de 5 à 4) ou la trajectoire en cours (passage de 4 à 3).

Les cinq modes de conduite du vol en détail

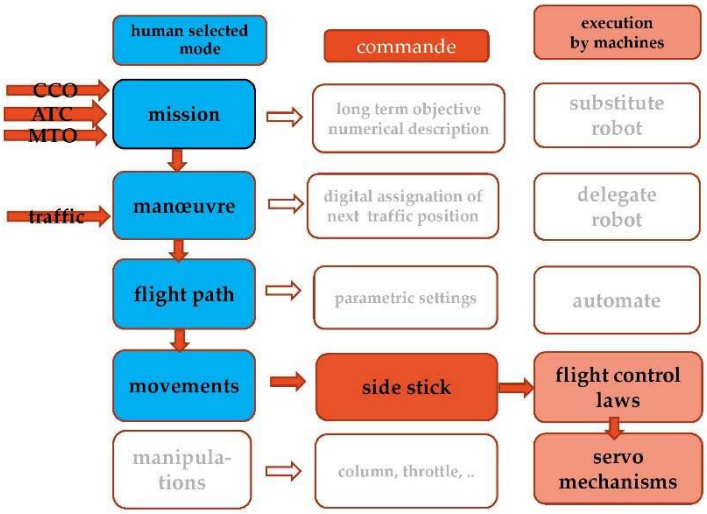
En partant d'une automatisation limitée aux servocommandes jusqu'à une automatisation complète, l'opérateur embarqué pourra contrôler le vol en adoptant l'un des cinq modes évoqués, caractérisé par la nature des ordres et commandes appliqués.

par braquages (des surfaces mobiles, ou déformation, voire déviation de jet, réglages de doseurs, manipulation du centre de gravité). C'est l'activité constante du pilote d'aéronefs simples ou relativement anciens. Directement ou par l'intermédiaire d'actuateurs (pouvant être commandés électriquement) qui augmentent la puissance du pilote, le déplacement d'une gouverne provoque l'apparition de forces appliquées à l'appareil, qui se traduisent par une « accélération » (au sens de la dynamique) qui modifie la vitesse (vecteur) de l'avion. La « manette des gaz » commande un doseur qui est une forme de gouverne déclenchant la force propulsive, essentielle. Le pilote corrige ces commandes jusqu'à obtenir l'effet recherché, au travers des effets aérodynamiques, de mécanique du vol (attitude, inclinaison) et thermodynamiques. Dans cette optique l'inclinaison (roulis) est une forme de « braquage » des ailes pour faire apparaître une force centripète. On peut considérer que même en aviation légère, ce mode est en voie de disparition et qu'il n'est plus même possible sur les appareils



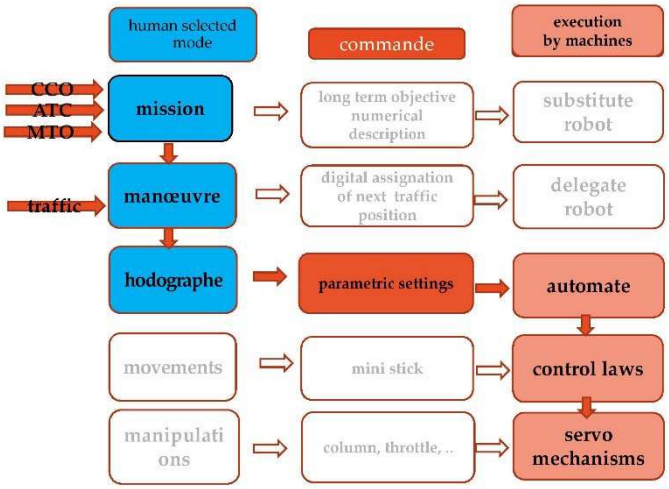
modernes de transport, en raison de la multiplication des surfaces mobiles. A fortiori le processus de déformation continue des surfaces portantes rendra nécessaire une dose de calculs intermédiaires.

par évolutions (prises de taux de virage, de facteur de charge,..) provoquant un changement de vecteur-vitesse. Il s'agit donc de commander des accélérations, par la manipulation d'organes ressemblant aux commandes classiques, mais de signification différente. L'intervention de calculs (« lois de pilotage ») transforme l'expression de cette commande (pressions ou déplacements de « manettes ») en ordres de braquages (application de forces) précisément déterminés et coordonnés en s'appuyant sur la mécanique du vol et prenant en compte les phénomènes aéroélastiques ainsi que les efforts sur la structure. On peut appeler les calculateurs : « augmenteurs » car ils augmentent l'habileté du pilote manœuvrier. La commande reste effectuée par les leviers et manettes classiques (le manche latéral en fait désormais partie). Il faut noter que les augmenteurs intègrent nominalement les protections de domaine de vol (au sens mécanique) : lorsqu'elles sont actives le pilote ne peut commettre la maladresse de dépasser ces limites. Inhiber ces protections (selon certains dysfonctionnements) fait retourner au stade « par braquages » alors qu'il serait peut-être plus judicieux de passer au stade supérieur « par trajectoire/hodographe ».



Le FADEC s'assimile à ce genre d'automatismes. La poussée nécessaire au vol selon un profil de vitesses dépend de nombreux paramètres (masse, centrage, aérodynamique, traînée, pente), et le débit de combustible nécessaire dépend aussi de nombreux paramètres, d'environnement, d'aérodynamique, de rendements, des prélèvements de puissance ; les variations de poussée demandées doivent être gérées avec soin pour la santé du moteur. Le FADEC est donc un automatisme très sophistiqué, et la gestion des changements de régime est délicate.

par trajectoire « air » (locale) La trajectoire fait passer d'un état défini par des paramètres (voir plus loin « vecteur d'état généralisé ») à un autre état, dans le référentiel « air » . Dans ce mode la commande comporte l'indication des vecteurs-vitesse successifs, c'est-à-dire un **hodographe**. Il s'agit ensuite d'enchaîner des évolutions (accélérations) pour réaliser la trajectoire (l'hodographe, puisque le vecteur-vitesse est l'intégrale des accélérations). Il y a donc planification puis ordonnancement et commande. Dans l'analyse ici exposée on limite le « pilotage par trajectoire » à des changements d'état, ou bien de durée assez courte (temps caractéristique la minute), ou bien par enchaînement de phases

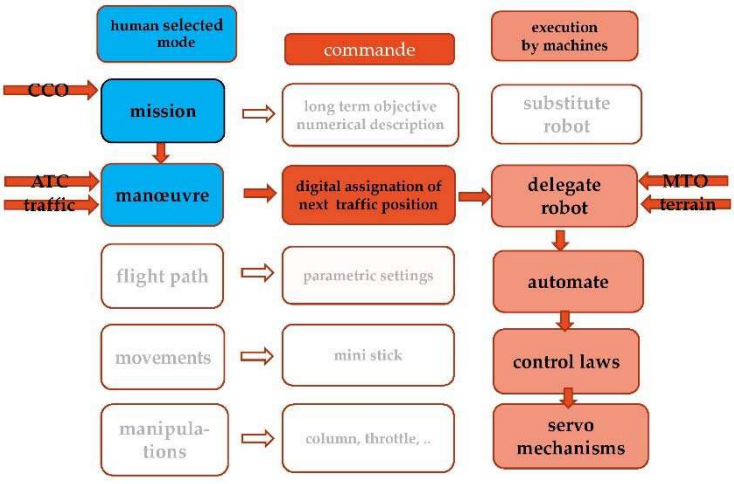


simples (maintien prolongé de certains paramètres). Dans ces conditions la trajectoire peut être réalisée par un « automate » qui reçoit des consignes détaillées paramètre par paramètre. Il n'y a pratiquement pas de planification par la machine. La commande consiste alors en l'introduction des consignes (paramètres de l'hodographe) par la manipulation d'outils électriques, électroniques ou informatiques. Du point de vue de la conduite du vol l'automate travaille en boucle ouverte, sans considération sur l'aboutissement de la trajectoire qui se réalise dans le référentiel air. En particulier l'automate « ignore » le contexte (terrain, météo, contrôle). L'automate respecte naturellement les limites du domaine de vol normal (vitesse, incidence, facteur de charge) ; l'atteinte des limites se traduit par des changements du comportement de la machine, signalé habituellement comme « mode de pilotage (automatique) ». La logique de l'automate doit à la fois masquer ces changements par un « lissage », et refuser des ordres d'hodographe impossibles à exécuter dans les limites normales (incohérence des ordres et du modèle de l'appareil).

Commentaire. La terminologie employée demande éclaircissements. Du principe selon lequel le vol est une intégrale résulte que chaque stade en est une dérivée, au sens mathématique. Pour le mode 3 la trajectoire est l'intégrale des vecteur-vitesse, et par conséquent la commande porte sur ces vitesses, il s'agit de respecter un hodographe. Toutefois cette notion a paru lors d'une précédente rédaction trop abstraite. Le terme « trajectoire » à comprendre comme « locale » fait malheureusement confusion avec la notion de trajectoire (globale) retenue dans les travaux sur la circulation aérienne (SESAR).
De même, la dérivée d'une vitesse étant une accélération le mode 2 devrait s'intituler « par accélérations » c'est-à-dire modification du vecteur-vitesse. On retrouve clairement l'accélération dans la commande d'un facteur de charge, mais aussi dans un taux de virage (accélération centripète). Le terme « évolution » a paru à l'origine plus accessible.

Nota : Si les trois premiers modes restent dans le référentiel « air », le troisième se distingue par le fait que la commande s'exprime en termes de **résultat** (l'**hodographe** ou la trajectoire locale), alors que les deux premiers font appel à des **moyens** mis en œuvre dans l'intention du résultat mais non déterminés par celui-ci. Le pilote classique « manuel » procède de fait par itération, alors que l'automate calcule avec précision l'ordre à donner et corrige en continu pour obtenir l'hodographe commandé.

par manœuvres, c'est-à-dire par commande d'un but à atteindre (résultat) en respectant des contraintes (respect des zones autorisées, suivi du plan accepté par le contrôle, évitements météo, etc.). L'objectif de la manœuvre (aboutissement du parcours ou trajet) est soit lointain soit complexe («4D ») , l'atteinte nécessite une planification élaborée sous contraintes. Son automatisation relève d'un « robot délégué ». La commande comporte alors des instructions relevant d'un dialogue préalable entre la machine et le conducteur du vol. En effet la machine ne pourra exécuter que les manœuvres pour lesquelles elle aura reçu un programme et la machine requiert le renseignement des paramètres nécessaires au programme. Une fois les conditions remplies et les données/instructions assimilées par le programme, le robot délégué commande des trajectoires aux automates qui commandent des évolutions. Il intègre des informations puisées à l'extérieur (à sa demande ou injectées par un canal ouvert), concernant le terrain, les zones interdites, la météo, le trafic voisin.

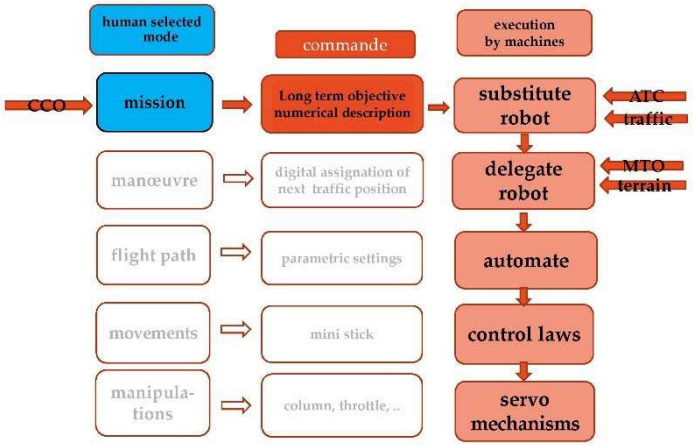


Ces informations sont traduites en facteur de risque, et le programme comporte des critères d'acceptation du niveau de risque ; en cas de dépassement le robot réclame une prise de décision par un opérateur (« reprise en mains »).

Les manœuvres air/air se déroulent entièrement dans le référentiel « air », elles sont relatives. L'exemple type est l'interception, au sens militaire, mais aussi la prise d'emplacement dans une file d'appareils dans une position relative, qui est l'interception d'une « bulle » allouée. Une manœuvre air/sol est une transition d'un référentiel à l'autre, ce qui n'implique pas le contact avec le sol proprement dit, mais une prise de position définie par un repère géographique (typiquement balise ou point de compte-rendu). À l'avenir un horaire y sera toujours associé (notion de « 4D »). Enfin une manœuvre sol/sol est un trajet entre deux points « sol », obligatoirement associé à un horaire.

Du point de vue de la conduite du vol le robot travaille en **boucle fermée** puisque la manœuvre doit aboutir à une position spatiotemporelle bien définie qui en marque la fin. Il faut définir des tolérances sur les valeurs effectives des paramètres contrôlant cet aboutissement, et prévoir la suite à donner à un échec. C'est à ce point que les considérations mathématiques sur la stabilité dans l'approximation prennent un sens. Une qualité du pilote humain est sa capacité à mener à bien sa mission de façon continument approximative, mais dans des limites ajustées par son expérience en fonction des circonstances. Il est plus difficile d'obtenir ce résultat avec des machines qui observent étroitement les critères de conformité.

par mission (planifiée), enchaînement de manœuvres (contingentes). Il s'agit alors de l'automatisation complète, dont le propre est de traduire des consignes simples en ordres complexes. La machine doit alors être un « robot substitut » capable de prendre en charge l'ensemble des actions nécessaires à la planification des manœuvres selon les critères qui lui sont donnés. Les manœuvres sont affectées à des robots délégués qui sont commandés selon l'ordonnancement. Le robot substitut est capable de modifier la planification ou l'affectation des manœuvres en fonction d'informations qu'il recueille, ou de consignes reçues du CTA. Les instructions du CCO, étrangères au contexte, transitent par l'opérateur embarqué, qui peut les négocier en fonction de la situation effective à bord.



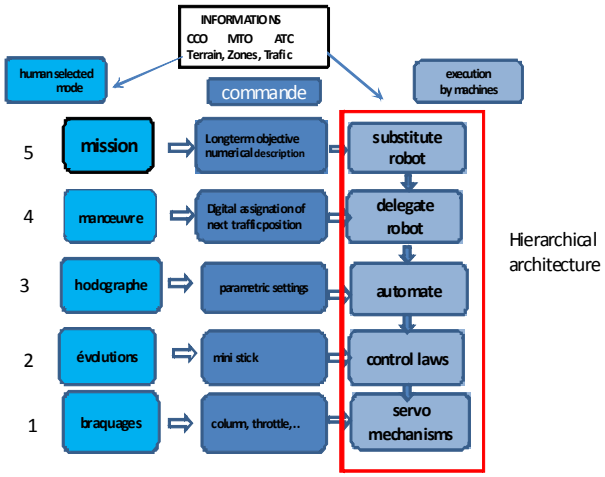
La notion de mission peut être prise à différents niveaux. Dans le dispositif global du transport aérien, un processus de programmation se déroule continument, associant les acteurs principaux : l'entreprise responsable (actuellement la Compagnie aérienne), qui veut satisfaire un marché par l'exécution d'un programme de vols, les aéroports concernés, les services de navigation contrôlant les parcours, les autorités diverses. In fine un équipage se voit confier la **méta mission** « transporter à l'heure dite, d'un point à un autre, avec un appareil désigné, une cargaison identifiée ». Dans cet équipage les Contrôleurs aériens successifs sont affectés par leur tour de service. Les représentants du CCO et de l'équipage embarqué ont pour première mission de préparer le vol : choix des itinéraires et détermination de l'équipement et de l'avitaillement, et autres sujétions réglementaires ou industrielles, embarquement.

L'exécution du vol **au sens commercial** fait apparaître plusieurs missions : roulage jusqu'au point d'arrêt, phase aérienne proprement dite, de l'entrée sur la piste jusqu'à la sortie à l'arrivée, roulage jusqu'au poste, et en parallèle maintien sous contrôle de l'appareil et de ses équipements. Cette dernière tâche permanente, considérée comme une mission au sens classique, est prioritaire et peut conduire à substituer une mission de repli à la mission nominale en cours (déroutement pour avarie, problème de cargaison, aggravation météorologique, indisponibilité aéroport,…). Si les missions de repli ont été anticipées elles peuvent être programmées dans le robot substitut. À la limite, relève de ce domaine le concept de déroutement entièrement automatique déclenché pour contrer une tentative de capture.

Hiérarchie des modes de conduite du vol

Le premier mode échappe à l'automatisation ici étudiée.

Le second mode n'est pas automatisé en ce qui concerne la conduite normale du vol, mais admet l'inclusion d'automatismes (plus loin qualifiés d'intrusifs) de protection contre les ordres anormaux ou excessifs de la part du pilote humain. De tels ordres ne seront pas donnés par des automatismes d'ordre supérieur.



Hierarchical architecture

Le troisième mode est un mode de « pilote automatique ». Les automatismes en service ne respectent pas toujours le concept de conduite par hodographe (vecteur-vitesse décrit en fonction du temps par son module et son orientation tridimensionnelle), cette incomplétude doit disparaître. Le régime de boucle ouverte impose une surveillance constante.

On a ensuite distingué deux niveaux de robotisation :

- Le « robot délégué » reçoit des consignes détaillées pour l'exécution de sa tâche, et assimile d'autres informations pendant l'exécution de la manœuvre. Les automatismes actuellement en service ne font pas toujours la distinction entre automate et robot, ce flou doit disparaître.
- Le « robot substitut » reçoit un cahier des charges décrivant les résultats à obtenir, mais recueille par lui-même les informations venues de l'extérieur comme de l'intérieur nécessaires pour établir une planification de manœuvres, et traduit cette planification en consignes qui sont transmises aux robots délégués.
- La planification élaborée par le robot substitut (en fait par les algorithmes qui le constituent) est soumise à l'opérateur « contrôleur » embarqué, sauf si celui-ci devient indisponible, auquel cas une procédure spéciale doit être mise en œuvre.
- Le régime en boucle fermée des robots autorise une surveillance moins stricte, surtout dans certaines phases en fonction de l'environnement. A la limite le robot substitut évoque la possibilité du vol « sans pilote », mais conduit bien plutôt à une révision des critères de composition et d'activité de l'équipage embarqué.

Une conclusion fondamentale de l'analyse pratiquée est la structure hiérarchisée de l'ensemble des modes de conduite du vol, et par conséquent du système d'automatisation.

L'opérateur maître du vol doit avoir fourni aux automatismes toutes les informations nécessaires à l'exécution de leurs tâches, et les automatismes ne doivent pas pouvoir fonctionner si les informations ne sont pas complètes et cohérentes.
Chaque automatisme doit disposer de tous les automatismes de rang inférieur nécessaires à sa fonction, et en même temps doit leur fournir la totalité des données décrivant leurs tâches. Pour chaque automatisme proposé il faut identifier clairement sa position dans le système, et par conséquent la totalité de ses liens avec les autres automatismes. La confusion entre automate et robot est dangereuse ; il n'est pas sûr qu'elle n'existe pas dans les équipements en service, ce point mérite d'être vérifié.

L'opérateur humain peut évidemment choisir son mode de travail et faire intervenir l'automate ou le robot de son choix, mais doit bien en tirer les conséquences. En particulier une manœuvre ne doit pas être réalisée avec un mélange de modes manuels et automatiques ; pour respecter la hiérarchie du système, il faut choisir un niveau et s'y tenir.

Dans ces conditions se construit un système hiérarchisé dans lequel l'humain dispose de la primauté.

Prospective

Le mode d'action directe sur les servocommandes est pratiquement et sera à l'avenir complètement abandonné. La commande d'évolution est devenue un classique, c'est le mode actuel de repli de base. Compte tenu du niveau technologique (fiabilité et maîtrise de la dynamique du vol**), c'est le mode « par hodographe » (trajectoire locale) qui doit devenir la règle pour la conduite du vol au niveau minimal d'automatisation, de « reprise en mains ».**

D'où la recommandation : développer et implémenter un organe synthétique de maîtrise de la trajectoire locale (hodographe) comportant une présentation et une commande.

Les commandes traditionnelles en deviennent inutiles.

Note : la disparition des commandes traditionnelles est une perspective lointaine. Dans un premier temps il faudra accepter le retour aux modes 2 voire 1 sur décision consciente d'un opérateur habilité. Le pilotage se fera alors d'abord avec les commandes traditionnelles, puis avec des commandes miniaturisées de secours (type aéromodélisme).

L'avenir devrait voir le mode 5 « mission » prédominer dans un système où l'automatisation concernera de façon cohérente l'ensemble des parties prenantes (sol inclus).

L'étape prochaine précédant ce stade devrait être la **mise à la disposition de l'équipage d'un ensemble complet et cohérent de « robots délégués » permettant la conduite totale du vol par manœuvres.**

Conclusions du chapitre

Tableau des modes

MODE	Typologie de la commande	Principe	Effets	Référentiel	Opérateur	Collecte des informations externes
1	Braquages de surfaces mobiles Réglage de doseurs	Création de forces Utilisation de moyens	Accélérations	AIR	Pilote traditionnel	Toutes par pilote humain
2	Evolutions	Demande d'accélération Utilisation de moyens	Vecteur-vitesse		Pilote moderne	
3	Hodographe Trajectoire locale	Demande de résultat : vecteur-vitesse	Trajectoire		Automate en boucle ouverte Surveillance continue exigée	
4	Manœuvre (décomposable en trajectoires)	Demande de résultat : atteinte d'un but prochain, spatiotemporel.	Parcours jusqu'au but intermédiaire demandé	AIR ou SOL + temps	Robot en boucle fermée (robot délégué)	Météo, terrain, zones interdites, par robot. ATC, CCO par opérateur humain embarqué
5	Mission (décomposable en manœuvres)	Demande de résultat : atteinte du but du vol commercial (opérations)	Manœuvres successives jusqu'au but du vol	SOL + temps	Robot en boucle fermée. (robot substitut)	Toutes infos par robot substitut sauf CCO par opérateur.

Règles de conception et d'implémentation

L'analyse qui précède conduit à énoncer des règles de conception, implémentation et utilisation pour les automatismes du système de conduite du vol :

Règle # 1 : identifier strictement la place de l'automatisme dans le système, sa fonction dans le mode de conduite correspondant (ne pas confondre robot et automate, automate et calculateur de commandes)

Règle # 2 : respecter strictement la structure hiérarchique du système, chaque automatisme de rang N ne doit recevoir d'ordres que du niveau N+1, et n'en donner qu'au niveau N-1

Règle # 3 : s'assurer strictement de la complétude de chaque automatisme, sinon le déclasser au rang inférieur

- l'automatisme de rang N doit pouvoir commander tous les automatismes de rang N-1 nécessaires à sa fonction
- l'automatisme de rang N doit prendre en compte toutes les données et informations conditionnant l'exécution de sa fonction

Règle # 4 : dans le cas d'un arrêt de fonctionnement du mode N sélectionné, le système doit revenir au mode N-1, et non au mode N-2.
Règle complémentaire : dans un tel cas le mode N-1 doit maintenir un vol sur jusqu'à l'intervention d'un opérateur (humain)*. Le retour au mode N doit être commandé par cet opérateur.

Règle # 5 : aucun automatisme ne doit pouvoir commencer à fonctionner si les informations et ordres reçus ne sont pas complets et cohérents.
Règle complémentaire : la validité des ordres et informations doit être obtenue sous une forme minimaliste.
Conséquence : la cohérence et la complétude des données doivent être vérifiées automatiquement sur la base d'une modélisation adéquate.
Note* : Cette règle implique que l'automatisme (de rang N-1) est effectivement en état de conduire le vol, c'est-à-dire qu'il dispose de toutes les informations nécessaires ; c'est pourquoi il est préconisé plus loin, outre une vraie redondance des sources, la production de données indirectes. Se pose également la question de la durée acceptable avant intervention, qui doit pouvoir être tenue par l'automatisme ; ce point ne sera pas discuté ici.

HUMAIN vs MACHINE

De facto l'automatisation est assimilée au remplacement de l'humain par une machine. Or un grand dilemme apparaît immédiatement,

L'Homme n'est pas sûr, la machine n'est pas intelligente.

Par ailleurs toute qualité peut devenir un défaut. Par conséquent comment répartir les rôles pour bénéficier des qualités et écarter les défauts ? On peut essayer de rendre l'Homme plus sûr en surveillant ce qui se passe dans son cerveau. On peut essayer de rendre la machine intelligente, en accumulant la science de multiples experts, et en imitant le cerveau. Ces deux approches posent un problème éthique de démiurgie technoscientifique, mais le niveau actuel de développement laisse encore le temps de régler ce problème. Aussi la suite ne s'en préoccupera pas.

Irréductibilité de l'humain et de la machine

Une comparaison des deux candidats est utile :

Humain	Machine
• « Fabrication » hors finalité • Population candidate limitée, diversité d'origines • Influences extrinsèques : culture, éducation (sentiments, langue, rapports sociaux) • Formation: enseignement et inculcation sur niveaux supérieurs • Fonctionnement contingent (stress, fatigue, simulateur,…) • Physiologie circadienne individualisée • Pas de conscience de panne propre, dysfonctionne • Non déterministe, approximatif • Pugnace, inventif, donc peut être obsédé, obstiné • Cerveau relativement lent (flux et traitement) • Capteurs naturels permanents sensoriels limités • Surtout séquentiel • Cerveau toujours actif	• Fabrication selon plans • Ressource illimitée (produit industriel) • Programmation totale (hard+soft) • Accumulation des savoirs des concepteurs • Configuration et mémoires stables. Peut être standardisé • Capable de fonctionnement répétitif, insensible au temps passé • Arrêt sans état d'âme sur panne • Localement déterministe, utilise des arguments précis • N'invente rien • Transfert et traitement très rapides des données • Capteurs selon construction et technologie • Parallélisme possible • Position « off »

On peut aussi y ajouter une profonde différence dans la représentation de la situation sensible que peuvent former d'une part la machine, qui se place dans un « espace d'états » à l'aide des mesures de multiples paramètres, et d'autre part l'humain qui réagit dans « l'espace-temps » quadridimensionnel familier. Par exemple la machine utilisera une pression, qui est traduite pour l'humain en altitude, notion non fonctionnelle pour les machines.

Enfin, seules les machines peuvent faire l'objet d'une approche scientifique, au sens de la vérification (ou falsification) expérimentale des hypothèses. On peut imaginer soumettre une même machine, ou des machines identiques, à des séries répétables et répétitives d'expériences par des opérateurs indépendants. Rien de tel avec l'humain, il n'existe pas deux exemplaires identiques et toute expérience le modifie. En toute rigueur les travaux sur les « facteurs humains » ne peuvent être qualifiés de scientifiques, ce qui n'enlève rien à leur difficulté et à leur importance. En l'absence d'un corpus déductif il n'existe pas de science des facteurs humains, il s'agit d'une ingénierie inductive qui porte ses fruits. Le Pont du Gard a été construit sans théorie de l'élasticité.

Cette comparaison montre que l'humain et la machine sont irréductibles l'un à l'autre. La notion de « remplacement » est donc erronée au sens strict. D'une part la machine reste la création d'humains et garde la trace de cette origine. D'autre part les tâches qui peuvent être confiées à la machine restent limitées, tant par des considérations pratiques (utilité immédiate de mettre en œuvre des machines en l'état de l'art) que théoriques (nature algorithmique compliquant les validations). A la limite, certaines recherches aboutiraient à construire un pseudo-cerveau qui serait « instruit » (programmé) et serait capable d'apprentissage autrement dit un pseudo humain. L'emploi de cet artefact serait plus un « déplacement » qu'un « remplacement » de l'opérateur humain. Seul un humain est capable de résoudre un problème d'ordre éthique, par exemple choisir un lieu de crash en l'absence de données certaines, voire d'adapter les règles à la situation inédite.

Humanité de l'humain

Dans l'évolution du système de transport traditionnel, l'humain « pilote en fonction » ou « commandant de bord » (seul maître à bord après Dieu) a été considéré comme le recours en cas de panne des machines, y compris des automatismes mis en place progressivement. Il était donc réputé pratiquement parfait.

Or les accès de faiblesse, intrinsèques à la nature, pouvant aboutir à des déficiences ou défaillances, ne manquent pas à tout humain « normal » :

- Physiologiques, pas toujours faciles à identifier
- Psychologiques, induites par la vie sociale, acquises par l'éducation, voire innées

– Naturelles : usure de la mémoire par exemple.

L'humain est un être social, qui réagit à la nature des relations avec ses semblables, et dans le cas des pilotes, soit directes (au sein de l'équipage), soit indirectes (avec les concepteurs des machines).

D'autre part le système (certifications) prévoit l'interchangeabilité entre opérateurs humains de même qualification. Cette disposition n'est évidemment pas appliquée aveuglément, mais ignore tout de même l'idiosyncrasie des individus, en particulier en fonction de leur formation (contenu, ancienneté). Contre les inconvénients assez évidents de cette approche se sont multipliées les catégories de qualification, affectées de niveaux et de spécialisations (par type d'appareil, et par emploi), caractères appelant des formations et des contrôles, le tout favorisant l'hétérogénéité et les insuffisances.

Un autre aspect de l'humain est son encombrement, tant direct (corpulence) qu'indirect (commodités). Un avion militaire de combat est avant tout un pilote dont la présence définit largement l'architecture une fois pris en compte tout ce qui est nécessaire à ses actions et à sa vie. De là les drones. Si on considère la possibilité d'indisponibilité critique d'un opérateur humain, la solution de redondance par un deuxième opérateur ne fait qu'alourdir cet encombrement.

A contrario l'humain est chargé d'une performance particulière. On évoque l'interface homme-machine, mais en fait l'opérateur humain classé « pilote » est l'interface entre « tout », aussi bien la machine (affichages variés de textes, de données, de graphiques, bruits et émissions sonores), que les correspondants (messages vocaux et/ou écrits, téléfax, cartes météo), de sources locales (CTA) ou lointaines (CCO), en langue vernaculaire ou codifiée (phraséologie normalisée en « anglais »), développée ou contractée (acronymes, symboles). Il doit traduire toutes ces informations pour les rendre utilisables par lui-même et par les machines, alors que la technologie numérique permettrait de tout transmettre directement sous forme opératoire pour le destinataire.

Il est clair qu'à l'aune du paradigme du profit ces éléments poussent à l'automatisation.

Caractères de la machine

La miniaturisation, la standardisation des bases matérielles (« hard ») comme des normes, même de programmation, la technologie (solid state), permettent de multiplier à frais raisonnables les machines pour assurer la redondance. La résistance aux conditions extrêmes peut être assurée (températures, rayonnements). La mise à jour des « connaissances » (logiciels, paramètres et données) des très nombreuses machines en service est en principe facile (avec les moyens de communications numériques) mais demande de réaliser des connexions pas toujours évidentes. En contrepartie la rapidité d'évolution aboutit à avoir en service simultané une grande quantité de « standards » qui doivent être identifiés avant chaque usage, ce qui pose des problèmes de documentation et de formation de l'utilisateur. Les difficultés d'exploitation dues à cette diversité de standards ne sont pas intrinsèques aux machines, mais relèvent de leur gestion. D'autre part la machine est programmée pour l'exploitation avec des marges de sécurité (par rapport à la certification qui en prend déjà) afin qu'elle ne tente rien qui puisse conduire à un échec, éventuellement sous forme d'accident. Ces marges peuvent entraîner une perte sur la performance optimale de l'appareil en raison des précautions prises au niveau de la programmation pour tenir compte des incertitudes sur la connaissance et l'évolution immédiate du contexte, par exemple sur l'intensité des rafales ou de la composante transverse du vent.

Humain ET machine

Les réflexions qui précèdent conduisent à considérer que l'automatisation, c'est-à-dire (schématiquement) introduction de machines effectuant certaines tâches dans un système antérieurement opéré par des humains, ne doit pas se concevoir comme l'élimination progressive de l'humain mais comme un dispositif de coopération. Autrement dit

L'humain et la machine doivent « faire équipage ».

Cela est spécialement clair pour les opérateurs embarqués, tout en étant vrai au niveau du CTA et du CCO, dont il n'est pas traité ici.

Dès lors que la machine fait partie de l'équipage, l'IHM (interface Homme machine) devient une partie du CRM (management des ressources de l'équipage- crew - ou du cockpit). Les procédures de CDM (prise de décision collaborative) doivent aussi inclure « l'avis » de la machine. Sous cet angle on retrouve beaucoup d'évolutions des postes de pilotage (et de certains postes de CTA).

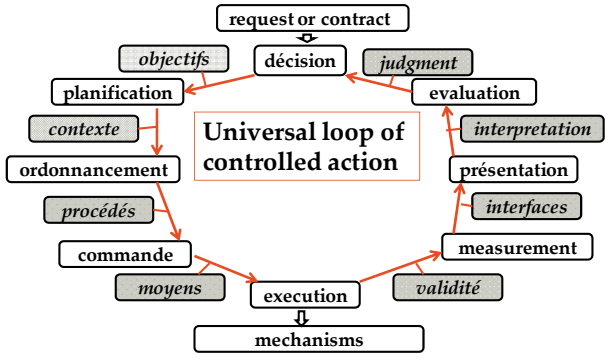
Il subsiste une difficulté. La conversation, si l'on peut dire, entre un être humain et un automate est par contre contrainte par un vocabulaire restreint et dépourvu de connotation : un automate ne comprend rien à demi-mot. Les actions qu'il exécute ont d'ailleurs été programmées par un être humain qui ne pouvait pas prévoir tous les incidents, tous les cas particuliers (auxquels aussi la relation avec les clients confronte une entreprise). Comment construire un dialogue constructif entre un humain qui s'exprime par discours dans une langue complexe, des gestes de manipulation, et une machine qui s'exprime par affichages listés, émissions sonores préfabriquées, éventuellement actions mécaniques ? La traduction numérique de la pensée au travers d'un clavier est très inefficace voire risquée en cas d'urgence (focalisation).

En revanche il est possible de tirer parti des caractéristiques de la machine (ce qui est parfois exposé comme « copilote électronique », renvoyant bien à la notion d'équipage). Par exemple, comme un formulaire, l'automate ou le robot est obtus et ne démarre que si toutes les cases sont remplies ; il est donc possible d'expliciter toutes les cases et d'inclure la liste de contrôle dans la programmation en vue de l'exécution d'une phase (trajectoire, manœuvre, mission), le « formulaire » étant adapté à chaque type de phase. L'automate doit exiger la prise en compte d'une caractérisation de l'environnement correspondant au domaine parcouru dans la phase programmée. On peut dire que l'automate oblige le suivi d'une liste de contrôle unique élargie à l'ensemble des paramètres de la mission.

En clair, par exemple, programmer un parcours de quelque durée que ce soit comportant la haute altitude ne sera possible qu'en remplissant des cases relatives à la météo prévue et à sa prise en compte (il ne suffira pas de noter « météo consultée »). Ce principe semble partiellement appliqué dans le réglage de certains automates réalisant des trajectoires. On préconise ici une **extension, avec répétition et redondance des conditions introduites**, et exigences cohérentes avec la phase de conduite du vol visée (simple trajectoire, manœuvre complexe, mission de durée).

L'humain dans la boucle

La mise en œuvre progressive d'automatismes a impliqué une sorte de partage des tâches dans la conduite de l'ensemble de l'avion considéré comme un système asservi à suivre une trajectoire commandée. Cet asservissement appelle la notion de « boucle » et fait apparaître le concept « humain dans la boucle ». Expression à la fois vague et forte par les contraintes imposées. Encore faut-il définir cette « boucle ». Nous adoptons l'analyse décrite en figure jointe, d'une boucle universelle s'appliquant à la conduite de toute action. Par la suite on s'attachera essentiellement au cas de la conduite du vol.



L'action est engendrée par un ordre (venu d'une autorité) ou par un contrat (engagement de l'opérateur envers un client). L'opérateur prend la décision de lancer l'action et établit une planification en prenant en compte les *objectifs* qui définissent pour lui l'action. On ne peut écarter l'hypothèse d'objectifs inconnus dissimulés par le donneur d'ordre. Cette planification établie, la prise en compte du *contexte* permet de traduire la planification en un ordonnancement des tâches à effectuer. La disponibilité de *procédés* définit alors la

commande, c'est-à-dire l'ensemble des mises en route des *moyens* constituant l'appareil, et leur fonctionnement amène à l'exécution de la commande sous la forme élémentaire des mécanismes. Toutes ces étapes sont la déclinaison des objectifs qui restent le substrat de l'action. Conformément à la structure d'un asservissement la boucle se poursuit par le retour des données caractérisant l'état atteint. Sous réserve de leur *validité* les relevés par des capteurs adéquats des paramètres de l'état forment un ensemble de mesures, lesquelles transitent par des *interfaces* vers une présentation à l'opérateur. En pratiquant une *interprétation* de cette présentation des mesures l'opérateur obtient une évaluation de la situation en termes de conformité aux objectifs. Il exerce alors sa capacité de *jugement* pour prendre une décision qui relance la boucle.

La description ci-dessus est évidemment « humanoïde », l'humain assure presque toute la boucle à l'exclusion de la commande détaillée des mécanismes, qui peuvent comporter des automatismes internes de bas niveau tels que les servocommandes, et en dehors de la phase de collecte, validation et présentation des paramètres, cette phase étant réalisée par des automates intégrés par le constructeur. Lorsqu'interviennent des automatismes de plus haut niveau ils assurent certaines étapes, et un partage avec l'humain justifie l'expression « dans la boucle ». Le fonctionnement de cette boucle dépend également de la temporalité.

La boucle, comme tout système d'asservissement est soumise à des perturbations venues de l'extérieur et peut souffrir de dysfonctionnements. La source majeure, et pratiquement toujours active de perturbations est le contexte.

La boucle est universelle car on la retrouve dans tous les domaines. Elle est fractale en ce sens qu'elle vaut aussi bien pour le programme annuel de la compagnie que pour la résolution d'un problème urgent en vol, mais simplement la temporalité dépend de l'application.

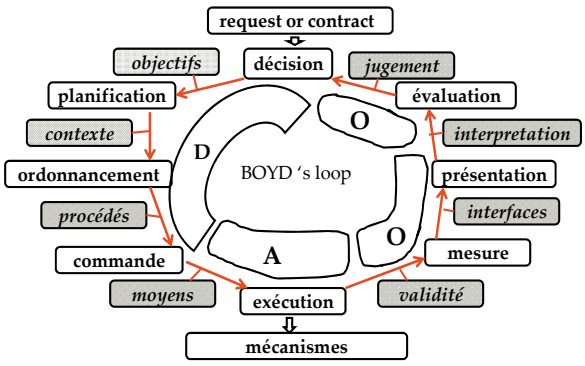
Dans les cycles à temps longs la « décision » est fréquemment implicite : laisser le processus se poursuivre. Dans les situations de crise gérées par l'humain le cycle est parcouru très vite (0,5 à 2 secondes), ce qui lui donne une apparence différente.

La temporalité est un point important : l'ordre de grandeur des temps caractéristiques en vol est :

- le quart de seconde pour la gestion d'une crise extrême
- le quart de minute pour la gestion d'une interruption ordinaire (ordre du CTA, panne d'équipement voire de moteur,..) ou d'une crise progressive (fumées, …)
- le quart d'heure pour une interruption stratégique (déviation météo, déroutement sanitaire,.

Au CCO, hors crises particulières, le temps caractéristique est normalement l'heure (de une demie à plusieurs), pour la gestion des anomalies ordinaires (aléas), ou l'assistance à un équipage embarqué. Pour l'ATM/ATC cela varie avec la nature de la zone contrôlée, de la seconde en approche (voir par ailleurs « qui pilote ? »), au quart d'heure en routes océaniques.

Boucle OODA



Dans les cas extrêmes de conduite du vol, le combat ou la crise urgente, les phases successives se condensent et la boucle revient à la boucle OODA (observe, oriente, decide, act) de Boyd.

La décision s'exprime instantanément par les commandes, et la phase cruciale reste celle du jugement sur la situation, s'appuyant sur l'observation pertinente.

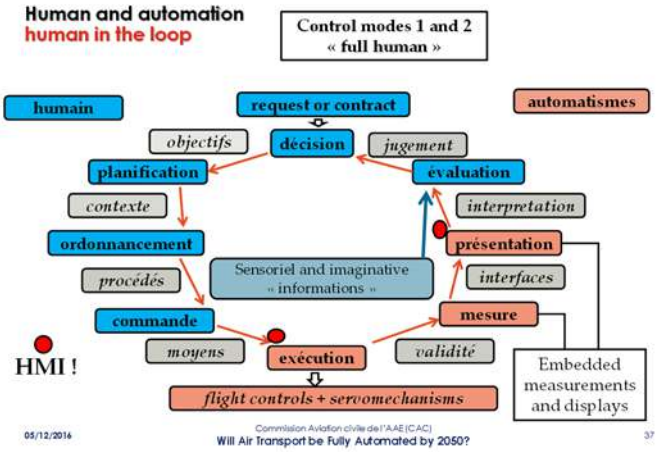
Sans être extrême la temporalité des phases finales du vol (approche en zone encombrée, CAT III), temps caractéristique de 5 secondes) demande des moyens de commande rapides.

La boucle selon le mode de conduite du vol

Dans les paragraphes qui suivent on examine comment fonctionne la boucle selon le mode de conduite adopté, par référence aux paragraphes du chapitre précédent.

Modes 1 et 2, modes dits « manuels »

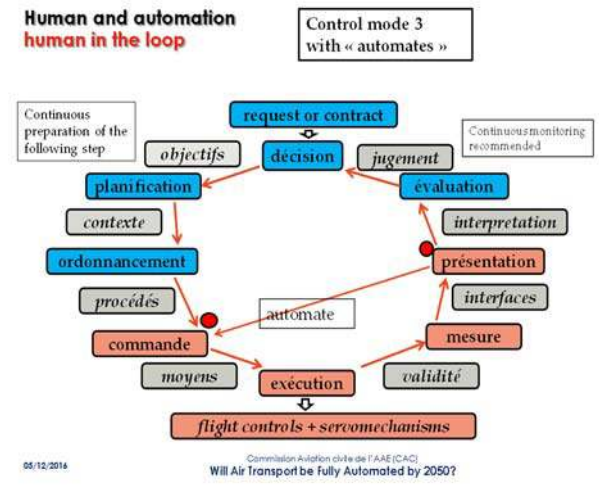
Dans ces modes il est important de noter l'intervention d'automatismes intégrés de telle sorte que leur caractère d'automatismes est oublié, ces dispositifs sont assimilés à la structure et aux machines accessoires. La phase exécution est assurée par les calculateurs et les servomécanismes. La phase mesure relève des capteurs installés en grand nombre, vérifiés et étalonnés avant la mise en service, dotés de processeurs plus ou moins « intelligents » qui contrôlent la validité de la mesure. L'ensemble des mesures est ensuite traité par des algorithmes prédéfinis en vue d'une présentation plus ou moins synthétique sur des écrans. Le conducteur du vol (pilote isolé ou équipage) peut seulement choisir la forme de synthèse qui lui paraît la mieux adaptée à son interprétation de la situation.



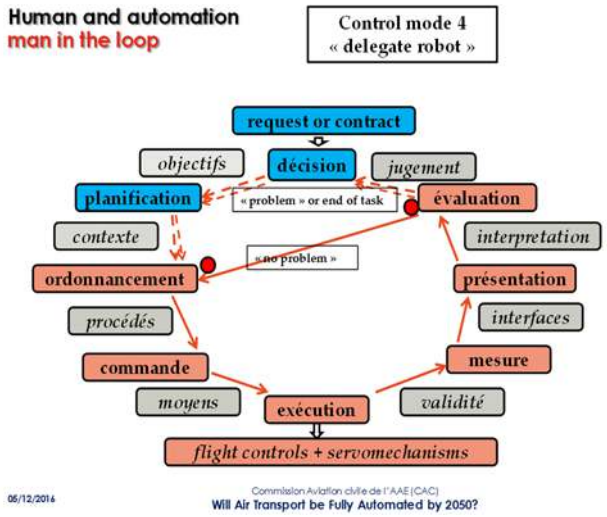
Les interfaces humain-machine sont alors d'une part les divers objets, poignées, manettes, boutons, utilisables pour les commandes des mécanismes, d'autre part les écrans avec toute la symbolique graphique imaginable, éventuellement des signaux sonores. Symétriquement la prise en compte du contexte (voir les paragraphes détaillant les modes de conduite) passe par la réception d'informations relatives au trafic, à la météo, à l'organisation de la circulation, aux intentions de la compagnie, sans omettre le terrain.

La conclusion de ce paragraphe est la charge considérable imposée au conducteur du vol (le pilote classique), et la nécessité de concevoir les interfaces en fonction de cette charge.

Mode 3, conduite par hodographe (trajectoire-air locale)



Au chapitre précédent ce mode a été défini comme le premier faisant appel à une économie de résultats, c'est-à-dire que la commande (de l'hodographe) s'adresse à un automate sous la forme du résultat à atteindre. A ce niveau il s'agit d'un automate (et non d'un robot), c'est-à-dire un automatisme qui exécute un algorithme isolé d'influences externes. Dans la boucle, l'automate prend les commandes, et procède selon une boucle qui « court-circuite » les phases opérationnelles en allant directement du résultat de mesure des paramètres à la commande, pour autant que les paramètres restent « normaux », pas de détection d'avarie, écarts faibles avec l'état objectif, entraînant les réactions d'asservissement. Cette mesure est transmise à l'automate sous forme numérique.



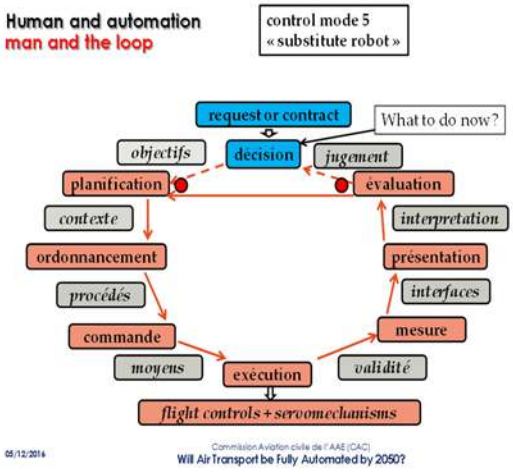
Il y a donc articulation de deux boucles, celle de l'automate et celle du conducteur, qui communiquent par les interfaces ; par rapport aux modes 1 et 2 on retrouve la présentation (mêmes écrans, représentant autre chose), mais l'autre interface se déplace pour donner accès à la commande globale. Comme on l'a souligné au premier chapitre ce mode exige une surveillance constante de la part de l'humain pour prendre en compte les données et informations venues de l'extérieur, ce qui est sans changement par rapport aux modes précédents. L'humain poursuit une boucle dont une partie est cachée, c'est-à-dire que l'humain, dans la pratique, ne se contente pas, une fois évalué la situation sur la base de la présentation, de maintenir les instructions données à l'automate, mais bien souvent profite des périodes d'exécution automatique pour penser à autre chose ou échafauder de nouveaux scénarios pour la manœuvre ou la mission. En tout état de cause les interfaces doivent être de nouveau adaptées au mode en usage.

Mode 4, conduite par manœuvres, exécution par un robot délégué

Comme on l'a exposé au premier chapitre, dans ce mode intervient un robot, c'est-à-dire un automatisme qui recherche, reçoit et assimile des données extérieures pour éventuellement modifier l'ordonnancement des trajectoires commandées aux automates du niveau 3. Par rapport au mode précédent (mode 3) le robot prend en charge deux étapes supplémentaires dans la boucle : l'interprétation des mesures pour établir l'évaluation de la situation au regard des objectifs, et le choix des procédés selon l'ordonnancement (des trajectoires) en tenant compte du contexte.

Les interfaces avec la partie humaine de la boucle se déplacent et doivent en conséquence être adaptées, en particulier porter sur les conséquences du choix d'ordonnancement par le robot répondant à la planification d'une manœuvre. Bien que largement robotisé ce mode n'est pas libérable de l'action humaine et demande une surveillance qui peut être intermittente. Dans la pratique, pour initialiser la manœuvre (étape « décision ») le conducteur doit pouvoir anticiper la réponse du robot (ordonnancement), mais le robot devra proposer plusieurs versions évaluées en fonction de critères opérationnels, tels que le coût ou les risques météo, voire le confort des passagers. Le conducteur sélectionne et programme la manœuvre qui prendra la suite de celle en cours. L'introduction de contraintes extérieures (météo, trafic, circulation) provoque un nouveau cycle. Dans tous les cas le jugement reste le fait de l'humain.

Mode 5, conduite par mission, exécution par un robot substitut



Dans ce mode le robot ne contourne que la phase de décision. Celle-ci n'intervient normalement qu'au cas où le conducteur reçoit de son entreprise un changement d'objectifs (destination) ou s'y trouve contraint (situation critique d'un passager), en réservant les questions de sureté hors ne notre propos. Par ailleurs des avaries peuvent empêcher la poursuite de la manœuvre en cours et le robot doit requérir une décision, qu'il soit ou non capable d'actions de traitement de l'avarie (par exemple incendie). L'interface se déplace encore et correspond à la vision d'ensemble de la mission, notamment des phases lointaines pour permettre éventuellement un changement de planification (contournements de zones).

Recommandations

En conclusion de ce chapitre sur la place de l'humain dans l'automatisation, des recommandations peuvent être proposées.

Quel que soit le degré d'automatisation **l'humain** (qui reste indispensable) **et la machine doivent « faire équipage »** en respectant réciproquement leurs compétences. Ceci inclut de ne pas mélanger l'usage de modes automatiques et manuels.

Conformément au principe (chapitre précédent) de strictes identification et hiérarchie des modes de conduite, **les interfaces doivent être adaptées à chaque mode** : sélection des informations, présentation synthétique bien qu'exhaustive, cohérente, immédiatement intelligible. La vision de l'écran doit identifier immédiatement le mode en fonction, avec les organes disponibles d'une part, les pannes ou avaries d'autre part. De même les organes de commandes disponibles doivent correspondre au mode adopté, et s'accorder à la temporalité des circonstances (la saisie par clavier peut se révéler totalement inadéquate). Ces dispositions permettent d'identifier sans ambigüité le mode en service et de signaler les changements.

Digression: Human and automation, an author's impression.

- D'un point de vue philosophique/ épistémologique, beaucoup des travaux en cours sur la relation homme/machine relèvent d'une régression vers un concept de milieu du XXème siècle. Il s'agit de se retrouver dans la situation d'un pilote confirmé, en pleine forme, conduisant un appareil extrêmement sûr qu'il maîtrise parfaitement, dans un contexte « VMC/CAVOK » en toute circonstance (règle « see and avoid »).
- Cette régression n'est pas sans mérite. La pratique du vol sur des appareils rustiques (pistons, hélices) pour des missions dans des zones déshéritées provoque une sélection. Les survivants sont de bons pilotes.
- Néanmoins nous pensons qu'il faut au contraire adopter une vision du milieu du XXIème siècle, dans un contexte d'espace complètement informatisé comme on le voit se développer avec « Big Data », les « Cloud », la connexion nomade permanente des personnes et des objets (IoT).
- L'avion est alors un robot de transport de personnes qui évolue dans un espace défini virtuellement par les données numériques qui lui permettent de calculer les ordres donnés aux mécaniques. Le niveau de précision exigé exclut les modes de conduite manuels.

AUTOMATISATION ET SECURITE

La multiplication des automatismes est corrélée avec une amélioration de la sécurité, sans qu'on puisse strictement attribuer l'une à l'autre.

Chacun des processus conduisant à accomplir une étape dans le fonctionnement de la boucle nécessitant un flot d'informations et se trouvant soumis à des perturbations, peut connaître des dysfonctionnements sinon des avaries. Des dispositifs automatiques peuvent alors être mis en place pour identifier, signaler, voire corriger ces dysfonctionnements. Il s'agit d'une surveillance (monitoring) et d'un mode d'action qui renvoie à la notion de copilote électronique ; par rapport au « PM » il est alors possible de bénéficier des qualités de la machine (vigilance, exhaustivité,

indépendance). Un tel dispositif peut conduire à des conflits d'autorité entre l'automatisme et l'opérateur humain, si des précautions ne sont pas prises dans la présentation du déroulement des programmes des machines et dans la formation des utilisateurs.

Priorité permanente : le maintien en bon état

L'étape « exécution » par les « mécanismes » cache tout le fonctionnement de l'appareil, de la structure à la cargaison en passant par la motorisation et les équipements. Toute anomalie de l'un des éléments est une source de danger direct ou indirect. Une mission permanente prioritaire est donc leur maintien en bon état.

On peut classer dans les automatismes tous les capteurs associés à un traitement permettant d'interpréter les mesures sur les matériels et la cargaison, et de déclencher des alarmes de divers types selon l'urgence, la gravité, et le fournisseur qui a pu faire certifier son produit.

Les comptes-rendus réguliers par certains équipements, au premier chef les moteurs, émis vers le constructeur sont fabriqués par des automatismes.

Certains équipements peuvent être dotés d'une capacité d'autoréparation. Plus généralement un automatisme fournit un diagnostic et une aide à l'analyse.

Dans le cas où un dysfonctionnement ne peut être compensé ou une avarie réparée il faut modifier la mission (déroutement, au minimum changement de conditions de vol), ce qui implique de changer (momentanément) de mode de conduite.

La surveillance des processus

Les processus de certaines étapes résultent d'actions effectuées par un opérateur, et ces actions peuvent souffrir d'une disqualité : omission d'un affichage, affichage incohérent, ordre ne correspondant pas au mode en service. Il est possible de prévoir des automatismes de vérification, voire de correction, de ces actions, à tout le moins de détection d'une anomalie.

Continuité de l'information

Des informations sur le contexte et son évolution arrivent constamment pendant le vol. Elles peuvent être adressées unilatéralement par une entité telle que le contrôle de la circulation ou la compagnie, ou diffusées comme un bulletin météo, ou bien sollicitées par le conducteur ou le robot en charge de la conduite selon le mode, ou encore obtenues par des capteurs spécifiques comme le radar météo. Les avancées technologiques, le développement des réseaux de bases de données (« cloud »), offrent de plus en plus de telles possibilités, et seul le principe est ici évoqué. Ces informations peuvent comporter un aspect de « menace » pour l'intégrité de l'appareil ou la sécurité du vol. Outre la numérisation, selon un format universel, ces informations doivent comporter une évaluation de la menace. Pour la météorologie se pose la question de la responsabilité du service émetteur ; celui-ci ne pourra fournir qu'une probabilité d'occurrence d'un phénomène approximativement classé en sévérité, et le pilote devra prendre la décision.

L'automatisation de l'information du conducteur doit comporter deux domaines :

- l'information du conducteur humain sous une forme assimilable (visuelle synthétique, voire verbale élaborée), non seulement à sa requête mais aussi de façon systématique programmée dans le cadre du mode en service. Le processus aboutissant à l'humain ne peut guère être que périodique, avec une fréquence relativement faible.

- la recherche permanente par les robots en service d'une information à jour et validée, restant sous forme numérique pour être immédiatement assimilée dans les algorithmes. La puissance de calcul et la rapidité des transmissions permettent d'éviter des délais trop longs de réaction aux menaces, et doivent aussi détecter les tendances qui sont une information très importante.

La sécurité directe du vol

Il s'agit ici des risques et dangers qui résulteraient des ordres de conduite. Les exemples ne manquent pas : application d'efforts excessifs sur la structure, surcharge des propulseurs, sortie du domaine aérodynamique contrôlable, entrée dans des zones réglementairement interdites, pénétration de zones météorologiques particulières (turbulences, givrage), convergence de trafics, proximité ou vol vers le terrain.

Les automatismes peuvent (doivent) intervenir sur quatre niveaux, la surveillance, la protection, la sauvegarde, le sauvetage.

La surveillance se traduit par des affichages mettant en évidence les points critiques, l'automatisation apportant des alertes immédiatement déclenchées (avant repérage de l'anomalie par l'opérateur humain), ou même résultant d'une extrapolation de la trajectoire.

La protection fait désormais partie intégrale des lois de commande de vol mises en œuvre dans la conduite manuelle (modes 1 et 2). L'automatisme qui limite une action devient momentanément le conducteur. Il est clair que les automates (niveau 3) ne donnent pas a priori d'ordre excessif.

La sauvegarde est une disposition plus forte dans laquelle l'automatisme impose une nouvelle trajectoire par une évolution locale sans changer les objectifs de la manœuvre (au sens du mode 4) : évitement des obstacles, du trafic, des zones interdites, des zones météo dangereuses. En modes 4 ou 5 de conduite, seule l'évolution d'une zone météo peut conduire à un risque nouveau nécessitant une correction de trajectoire. Les automatismes de sécurité emploieront plusieurs sources pour déterminer d'abord un risque ensuite un danger : capteurs de type radar, positionnements publiés (ADS), modèle de terrain, bases de données ouvertes (météo), assimilation des informations venues du contrôle et de la compagnie.

Le sauvetage implique des actions fortes à caractère exceptionnel pour échapper à un danger identifié : sortie de décrochage, remise de gaz, voire retour à terre automatique d'urgence par un robot substitut (assure la conduite du vol) sous contrôle du sol (fixe les objectifs). La question se pose de l'identification par un automatisme d'une action malveillante, interne ou externe, conduisant au passage à un rapatriement pleinement automatique échappant à l'action en cause.

Cette analyse fait apparaître une catégorie d'**automatismes « intrusifs »** qui ont la capacité de « prendre la main » pour une période plus ou moins longue. En revenant sur les chapitres précédents il devient nécessaire d'énoncer un complément à la règle de conception # 4 :

#4 bis : l'effet des intrusions ou interdictions ne doit pas provoquer le retour à un mode de conduite inférieur au niveau 3 (trajectoire locale).

Note importante : aussi longtemps que l'ensemble d'interfaces associées au Mode 3 ne sera pas disponible, il faudra admettre la possibilité d'un retour commandé à un mode « manuel »; c'est alors que les interfaces correspondantes devront être spécifiques. On peut pratiquement dire que l'interface de présentation des Modes 1 et 2 n'est autre que le panneau en T traditionnel, qui impose la maîtrise des paramètres vitaux.

Traitement de l'inattendu

Une situation inattendue est une situation connue posant un problème dont la solution a été programmée. Encore faut-il qu'elle soit reconnue lorsqu'elle se présente. Fondamentalement le vecteur d'état constaté est comparé à un catalogue ; il ne peut y avoir stricte identité entre un article du catalogue et le constat,

il faut introduire les incertitudes sur les mesures et une tolérance sur le catalogue. Dans le cas du pilotage humain le catalogue n'est autre que le fruit de la formation et de l'expérience. La solution réside dans les procédures apprises ou présentées par des automatismes passifs. La conduite automatique implique que le robot puisse apprécier la certitude de l'identification pour déclencher le programme ad hoc, ou « passer la main » en revenant au niveau inférieur.

Le catalogue recueille toutes les expériences et s'étend dans la mise à jour ; il devient impossible d'avoir un catalogue exhaustif à bord (ou dans le cerveau), le robot doit interroger des bases de données à distance (cloud).

L'inattendu peut être bénin, tel qu'un changement de contexte (météo, circulation) qu'un robot pourra prendre en compte (modification de trajectoire) à condition de recevoir les messages sous une forme adéquate (et protégée en sûreté) ; néanmoins dans le concept du présent essai la modification d'une manœuvre doit être approuvée par un opérateur humain (possiblement au sol).

L'inattendu peut être plus grave, comme la perte d'un propulseur, cas rare mais classique et facile à identifier (l'ensemble des automatismes est plus performant que l'humain pour diagnostiquer l'avarie). La conduite par un automate inclut la maîtrise de la situation (mode par défaut de maintien d'une trajectoire locale sûre).

> Le principe de la présente approche, présence d'un opérateur/pilote à bord, implique que l'automatisme en difficulté renvoie à cet opérateur. Les insuffisances, défauts ou erreurs de celui-ci peuvent transformer une situation inattendue bénigne en situation imprévue dangereuse.

Des combinaisons de cas simples peuvent créer une situation critique (météo plus circulation plus avarie en phase finale par exemple), mettant pour longtemps le robot en défaut (priorités), ce qui renvoie à la notion d'imprévu.

Traitement de l'imprévu

L'imprévu est ce qui n'a pas été intégré dans les programmes des automatismes. Les raisons de cette absence peuvent être multiples : cas de figure non imaginé, cas rencontré mais considéré comme improbable, cas connu et soluble mais pas encore intégré dans les machines (processus réglementaires et industriels). Quel que soit le niveau d'automatisme en service la poursuite de la tâche assignée est impossible. Selon les règles adoptées un opérateur humain doit intervenir : le comportement des automatismes doit lui simplifier la tâche et non la compliquer, par exemple en passant dans une configuration surprenante. Les robots ne reconnaissant pas la situation, le retour au niveau 3 est inéluctable. La question est la possibilité effective de conduire le vol selon l'état de l'appareil. Le rôle des automatismes paraît alors devoir être une présentation des ressources disponibles, plutôt que celle des avaries. L'hypothèse est ici faite que les équipements permettant la conduite au niveau 3 auront atteint la fiabilité des commandes de vol et seront donc disponibles, sauf destructions matérielles. La procédure automatique consiste à mettre d'abord en œuvre le mode « par défaut » de maintien d'une trajectoire acceptable. L'expérience et la compétence de l'opérateur (le pilote) remplacent la programmation. Si l'on admet de parer à des cas extrêmes il faut permettre de commander un passage au niveau 1 « manuel » sous forme de secours. Si l'automatisation en est arrivée aux niveaux 4 et 5, le robot peut contribuer en agissant comme un système expert qui affiche des analyses de la situation associées à leur probabilité, laissant un choix à l'humain (décision vraie en incertitude).

On n'ira pas plus loin ici dans l'analyse de la problématique du traitement de l'imprévu par le pilote humain, thème traité par ailleurs par des spécialistes.

Conclusion du chapitre

L'examen de la participation des automatismes à la sécurité montre la superposition de deux voies.

La première consiste à confier une partie croissante des actions (ou tâches) de conduite du vol, sur la base d'une plus grande fiabilité des machines (dûment programmées), quitte à perdre un peu en possibilité d'actions dans les cas marginaux.

La seconde consiste à superposer à la conduite normale une possibilité d'automatisme de conduite exceptionnelle intrusive surpassant les commandes à l'œuvre. Selon l'organisation globale on peut penser dans certains cas à une intervention depuis le sol. L'éventualité d'une intrusion injustifiée, sinon frauduleuse, doit être prise en considération et doit être empêchée.

Ces considérations renforcent les conclusions du premier chapitre sur l'exigence d'identifier très exactement la nature et la fonction d'un automatisme tout en respectant la hiérarchisation du système. Il s'agit d'éviter les « surprises » d'automatisation dans les situations anormales.

Le traitement des situations imprévues montre les limites de l'automatisation. Il convient donc de réduire le champ de l'imprévu en tirant parti de toutes les expériences vécues (organisation de la collecte) pour constituer une base universelle. La notion de modèle générique, et la connectivité extrême future ouvrent des possibilités.

Des cas extrêmes conduisent à maintenir un accès en secours au niveau purement manuel, précaution qui n'a de sens que si les intervenants (alors pilotes) ont les capacités adéquates.

L'AUTOMATISATION DANS LE SYSTEME GLOBAL

Espaces d'évolution

Le système de transport aérien est un système de systèmes complexes, qui fait que le vol se déroule dans trois espaces imbriqués :

- un espace macroscopique,

  ATM/CTA : régulation au moins par région (Europe,…)

  CCO : programme saisonnier, puis journalier avec affectation de la méta mission :

  vol O&D, date, équipage: PN + type avion

- un espace mésoscopique,

  planification,

  ordonnancement effectif des vols « du jour »,

  horaires, correspondances, servitudes sol,

- un espace microscopique,

  préparation du vol (informations: CCO, mise en place des servitudes, services),

  assemblage final: paramétrage pour vol

  plan de vol optimal: CCO + ATM

  exécution : équipage + CTA (évt. CCO)

Les principaux acteurs dans ces espaces sont :

- la compagnie, l'entreprise qui vit de l'activité de transport, et a donc le souci de la rentabilité
- l'équipage embarqué, qui a en charge la sécurité des passagers (et en outre les services)
- le contrôle de la circulation qui a (en principe, en tant qu'institution) en charge l'intérêt général.

Le fonctionnement du système est sensible dans son ensemble à tout ce qui remet en cause la planification et l'ordonnancement. Au niveau microscopique pratiquement chaque vol connaît une déviation du plan initial, et cette perturbation doit être circonscrite sans perturber l'espace supérieur. Tout ce qui perturbe l'espace méso est une anomalie, ce qui perturbe l'espace macro devient un incident pouvant avoir des conséquences étendues. C'est dans ce cadre qu'intervient l'automatisation.

Objectifs de l'automatisation

Les objectifs de l'automatisation du vol sont en réalité peu explicités, tellement elle paraît s'imposer comme naturelle, dans un monde où elle se développe exponentiellement dans tous les domaines. On a retenu deux objectifs principaux :

- l'amélioration de la performance globale au travers d'un traitement plus efficace des divers processus mis en œuvre. Le caractère algorithmique introduit cependant une certaine rigidité dans le respect des marges de sécurité, au détriment parfois de l'économie ; le bilan semble toutefois favorable à l'automatisation.
- la lutte contre les dysfonctionnements, pour des raisons de sécurité et des raisons finalement économiques : les conséquences d'un dysfonctionnement peuvent être banales et minimes, mais dans un système aussi complexe que le transport aérien dont l'économie est fragile il est nécessaire de tout éviter. La référence à la boucle universelle de conduite des opérations permet de recenser les dysfonctionnements perturbant les processus successifs, qu'ils soient effectués par l'humain ou par la machine.

Dans le cadre de l'essai présenté, il n'est pas entamé de processus d'examen de tous les dysfonctionnements identifiés ou à identifier encore. Une telle démarche n'est que suggérée aux spécialistes, dans la mesure où les certifications ne l'ont pas déjà faite.

Il a été précisé dès l'entrée que l'analyse ne se place pas dans l'optique d'une automatisation destinée à réduire, sinon supprimer l'équipage technique de conduite du vol. Cependant on ressent bien une pression pour élargir le domaine du pilote unique. Cette disposition est certainement favorisée par plus d'automatisation, sans qu'on puisse justifier ainsi la perspective d'automatisation totale (robot substitut). L'hypothèse d'un pilote unique est un problème en soi, qui est analysé dans d'autres ouvrages.

Classement des automatismes

Les automatismes peuvent être classés en quatre catégories :

	Opérations (vol nominal)	soutien
actifs	ORDONNATEURS (AUTOMATE, ROBOT)	INTRUSIFS (hors vol nominal)
passifs	AUGMENTEURS (lois de commande, servomécanismes)	INFORMATEURS (recueil, élaboration, présentation de données)

Chacune de ces catégories apporte une contribution à la performance du système, d'abord d'une façon directe à la sécurité, et aux termes économiques soit par la gestion directe du vol soit par l'amélioration des opérations.

Ordonnateurs. Ces automatismes ont été longuement évoqués sous la forme des automates et robots. Leur caractéristique est d'élaborer les ordres de commandes exécutées par les augmenteurs.

Les interactions entre les automatismes apparaissent ici clairement, caractéristiques d'un système complexe. L'architecture du système doit décider si l'interdicteur de transforme en ordonnateur ou si l'interdicteur modifie le programme de l'ordonnateur permanent.

Les « ordonnateurs automatiques » apparaissent au niveau des « robots » (délégués : type FMS), et sont au cœur de la problématique du nombre de « pilotes » (opérateurs humains embarqués). Les robots font appel continûment à toutes les catégories d'automatismes.

Augmenteurs. Ces automatismes augmentent les capacités de l'opérateur humain. Les servocommandes ont augmenté sa force, leur intervention est désormais « oubliée » comme partie intégrante du minimum. Les amortisseurs de lacet, le contrôle du freinage sont aussi assimilés à la machine de base. Les lois de commande ont augmenté l'habileté à effectuer les évolutions ou suivre les trajectoires avec précision (tenue des espacements).

On peut placer dans cette catégorie l'augmentation de la puissance visuelle, soit par des « lunettes » soit par projection d'une reconstitution du paysage à partir de détections et de bases de données.

L'ensemble de ces automatismes tente de transformer la conduite d'un appareil lourd et complexe dans un environnement délicat pour se retrouver à la commande d'un appareil facile par beau temps, ce qui simplifie le traitement des essaims en approche.

Note. Le néologisme « augmenteur » est peu élégant ; Jean Pinet a proposé « prothèse » qui correspond bien au concept. Pour la présente édition de son essai le rédacteur conserve sa terminologie pour éviter toute confusion sur l'origine des termes et l'antériorité.

Informateurs. Il s'agit initialement des capteurs et senseurs donnant l'état de la machine et du contexte : températures, pressions, niveaux de ressources à bord, puis éléments météorologiques ; l'estimation de la position géographique (balises, centrales inertielles, GNSS, radiosondes) s'y est ajoutée. L'automatisation intervient d'abord dans la présentation des résultats de mesures et dans le tri des indications, soit sur l'importance soit sur la validité. Un degré supplémentaire correspond à une première interprétation des mesures (par exemple météo), avec l'avertissement de situation anormale.

L'automatisme informateur est aussi mis en œuvre par l'opérateur (humain ou robot) pour rechercher et acquérir les informations nécessaires ou utiles à la conduite de la mission (contexte naturel, trafic, consignes).

L'automatisation peut aussi porter sur le contrôle et la combinaison de plusieurs mesures (jaugeage du carburant), ou l'exploitation des enregistrements du vol précédent, plus généralement contribuer à la préparation du vol, en allégeant le travail humain. L'automatisme informateur est aussi chargé de vérifier la cohérence des données représentatives de l'état et du fonctionnement de l'appareil (voir plus loin « le modèle ») et la cohérence des ordres de commande entre eux et avec le contexte.

Enfin l'automatisation (calculs) permet de donner une information prédictive par extrapolation de la situation en fonction des constats d'état de l'appareil et du contexte, et des commandes appliquées ou programmées. Ces prédictions peuvent déboucher sur des avertissements ou des interdictions (commande « automatique » d'intrusifs).

Intrusifs. On a vu les automates ou robots obéissant aux ordres ou consignes donnés par le « pilote ».

A contrario il faut prévoir des automatismes « intrus » qui agissent sans tenir compte du pilote :

- Garde-fous, ex. auto-RDG si finale hors des clous, ACAS
- Sauvegarde, ex. barrière d'arrêt en bout de piste, anti CFIT
- Sauvetage, ex : siège éjectable, rattrape décrochage.
- Désamorçage d'actions illicites, blocage de commandes dangereuses.

Ces types d'automatismes créent une problématique du déclenchement à tort. Ils ont pour but d'éviter des dommages ou une catastrophe potentielle. Ils sont bien connus : limites du domaine de vol, anticollision, évitement vertical du sol, évitement du relief, mais ne sont pas toujours installés selon les types d'appareils et réglementations. En principe les automatismes « ordonnateurs » des automates et robots ne donnent pas d'ordres conduisant à une interdiction ; par conséquent ces interdictions « automatiques » concernent essentiellement la conduite humaine. La terminaison de la manœuvre intrusive doit replacer l'appareil dans une situation aisément contrôlable (l'interdicteur peut être vu comme un « correcteur » de trajectoire).

Ces interdicteurs pourront intervenir contre des tentatives de détournement ou de crash volontaire.

Informations

Tout au long des développements précédents est apparu le rôle fondamental des informations. Le système d'information est la source de toute performance (sécurité, économie, …). Aucun des automatismes évoqués, y compris le robot substitut, n'est réellement autonome, en ce sens qu'il dépend toujours d'informations, intérieures sur l'état de la machine et extérieures sur l'environnement, le contexte. Les informations recueillies et présentées à l'opérateur sont déjà très nombreuses et ce foisonnement ne se réduit pas, au contraire il y a une tendance à « en rajouter ». Cette tendance est encouragée par la croissance de la puissance de calcul.

Les informations extérieures proviennent de sources fragmentées et suivent de « tuyaux » dont le coût est parfois élevé. Ces informations sont formatées selon des accords (réglementaires, normatifs, industriels) complexes mettant aux prises les détenteurs des moyens des stades successifs : capture de base, traitement, interprétation spécifique, formatage customisé, transfert généralement électromagnétique, réception, présentation. Les informations d'origine interne devraient poser moins de problèmes sous la houlette du constructeur.

La présentation des informations est fondamentale. Il s'agit des formats et protocoles pour celles qui restent sous une forme numérique pour être exploitées par les calculateurs des automatismes. Pour celles qui sont affichées à l'intention d'un opérateur humain se posent des problèmes de langues et de langages, et même de culture (sens des abréviations et acronymes).

Toutes les formes synthétiques (notamment graphiques) sont élaborées par des automates passifs ; leur interprétation même devrait devenir de plus en plus automatique, avec une capacité croissante de fusion de données d'origines différentes.

Les informations doivent être tenues à jour. Le procédé classique de fourniture à l'opérateur d'un dossier au moment du début de mission n'est plus acceptable. Les robots doivent comporter des automatismes informateurs qui relèvent en permanence des informations récentes. À l'avenir ces informations seront puisées dans un « cloud », les informations adressées seront limitées aux confidentielles. La sélection des informations pertinentes sur l'environnement sera automatique à partir de la position géographique. Une information approximative vraie vaut mieux qu'une information (d'apparence) précise mais fausse, ou indisponible.

Ce « cloud » sera réciproquement alimenté par les informations diffusées par chaque appareil (cf. ADS.B) au profit du trafic voisin (espacement, météo) et du CTA pour la localisation, et cette information sera prédictive, la trajectoire future de l'appareil étant publiée.

Il restera cependant à répondre aux questions de base :

- Quelles sont les informations essentielles ?
- Comment sont-elles obtenues ?
- Quelle en est la fiabilité ?

Pour y répondre au mieux les propositions suivantes se formulent assez évidemment :

- développer la multiplication des sources indépendantes, redondantes, de technologies différentes en maintenant fonctionnelles toutes les possibilités d'élaborer l'information : ne pas éliminer des techniques anciennes au prétexte de nouvelles apparues.
- assurer la cohérence et la production indirecte de valeurs probables par l'inversion du modèle mathématique.

Le modèle physico-mathématique

Rôle du modèle

L'ensemble des informations diffusées (d'abord au « pilote ») doit être cohérent. Cette cohérence globale doit intervenir dans les « votes » entre mesures localement non cohérentes. L'absence de cohérence détecte une anomalie. La vérification de cohérence repose sur le **modèle physico-mathématique** de l'appareil.
L'élaboration d'un modèle mathématique est le préalable à la conception par simulation.
Ce modèle est évident dans les simulateurs (développement et formation), il doit être exploité en vol pour l'élaboration des informations exigées par la conduite du vol.
Le FADEC contient pratiquement un modèle complet, avion plus moteur.

Les relevés d'état (« mesures de paramètres »), fusionnés dans le modèle (« contraintes ») sont nettement plus nombreux que les degrés de liberté, ce qui rend possible :

- la vérification de cohérence des mesures qui doivent correspondre à un état du système décrit par le modèle.
- la vérification de la continuité : le temps de réponse du système avion global implique que les paramètres ne peuvent pas varier arbitrairement.
- l'élaboration de la valeur la plus probable d'un paramètre devenu non mesurable, pour respecter la cohérence ; cette opération revient à privilégier, non pas la mesure la plus fréquente, mais celle qui s'accorde le mieux à l'ensemble des autres paramètres et respecte la continuité.

Au-delà, l'inversion du modèle peut permettre d'identifier les caractéristiques de mécanique du vol à la suite d'une avarie et d'adapter les lois de pilotage. Il est clair que la puissance de calcul nécessaire doit être disponible, et non défaillante.

La modélisation aérothermodynamique très détaillée mise en œuvre dans la conception permet d'identifier la présence en plusieurs milieux d'un même paramètre, et ainsi de multiplier des sources de la mesure indépendantes.

Dynamique généralisée

Il convient d'exploiter les possibilités de calcul toujours plus élevées et les théories mathématiques. À tout instant il faut optimiser la trajectoire à suivre (ou la manœuvre à exécuter), l'optimum pouvant porter sur les performances (y compris économiques) ou la sécurité. La trajectoire ou la manœuvre se définit par rapport à un contexte qui comprend la météorologie, le trafic, le terrain, et en tenant compte des caractéristiques de l'appareil. La nécessité de considérer tous ces paramètres conduit à des concepts généralisés, qui peuvent être manipulés mathématiquement pour optimiser la conduite du vol.

On ne peut ignorer que la multiplication des paramètres à traiter (composantes d'un **espace d'état**), et les non-linéarités rendent le problème difficile.

Vecteur d'état généralisé : le vecteur d'état de l'appareil est classiquement considéré en termes aérothermodynamiques et structuraux. À cette base il faut associer plus de paramètres à prendre en compte dans l'automatisation : caractéristiques de l'environnement (pressions, températures, givrage, turbulences, ionisation, vents, etc.), situés dans le référentiel air, paramètres de localisation en référentiel sol, ainsi que les données sur l'environnement (zones de contrôle, trafic proche). Le taux d'occupation

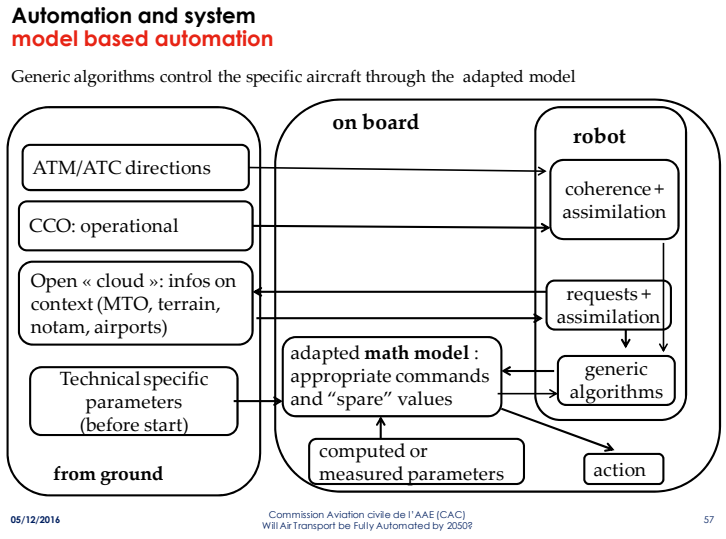
de l'espace aérien dans le voisinage, exprimé par le nombre d'appareils au km³ pondéré du volume de la bulle de sécurité de chacun, pourrait être considéré. L'ensemble des réglages et ordres de commandes en vigueur fait partie de l'état généralisé.

Domaine de vol généralisé : classiquement exprimé en fonction des paramètres du vecteur d'état de base, doit être complété en fonction des paramètres de la généralisation. Notamment limites atmosphériques, et aussi limites en référentiel sol : on peut dessiner un volume autorisé, avec des marges par rapport au terrain, mais incluant les pistes. Un domaine de vol autorisé spatial peut être défini par des polyèdres sans connaissance précise du terrain sous-jacent : les dispositions et dispositifs mis en œuvre pour enfermer les drones dans des espaces réglementés seront généralisés, notamment à l'usage du foisonnement de « personal planes ». Les mêmes principes seront transposés à tous les secteurs de l'aviation, y compris le transport.

Trajectoire généralisée : le changement d'état est l'effet de la trajectoire. La trajectoire entre deux états généralisés est la trajectoire généralisée, composée des trajectoires de tous les paramètres, lesquelles ne doivent pas être incompatibles. Il y a donc lieu d'écarter les actions restreintes telles que les évolutions par elles-mêmes, et toujours recourir à la commande d'une trajectoire (généralisée).
Le choix de la trajectoire n'est pas une opération simple dès lors que l'espace-temps local est encombré. Ce sera d'autant plus le cas avec la généralisation des zones à navigation précise dans lesquelles les appareils seront proches (avec le risque d'alertes anticollisions inutiles, voire de manœuvres évasives délicates dans l'encombrement, voir plus haut). Il apparaît que la trajectoire doit parfois être dictée par une autorité externe partie de l'équipage : la procédure et le procédé employés sont adaptés à l'interlocuteur, opérateur humain ou robot. Le membre humain de l'équipage embarqué doit-il intervenir comme transfert d'ordres ou simplement assister à l'opération prise en compte par la machine ?

La considération de ces concepts généralisés a pour conséquence la nécessité d'élaborer également des **ordres de commandes généralisés**. Les ordres élémentaires donnés à l'aide des commandes classiques (manche, etc.) ne peuvent être valables que s'ils s'intègrent dans la commande généralisée. C'est ce que le pilote humain traditionnel s'efforce de faire dans un processus mental qui doit tenir compte de toutes les données, visibles sur des écrans ou mémorisées (contexte, but de la manœuvre, etc.). Il s'agit d'un exercice de dynamique du vol complexe. Un calculateur sera mieux à même d'appliquer toutes les lois de l'aérothermodynamique mises en œuvre. Le nombre de paramètres à considérer, le besoin de mettre à jour en temps réel les données externes et internes, tout concourt à une automatisation de la transformation de l'objectif fixé par l'opérateur en ordres de commandes.
C'est ce qui définit les automatismes examinés plus haut. On n'oublie pas que, notamment grâce au FADEC, certains modes de fonctionnement des automates actuels répondent partiellement à ces concepts. L'un des objectifs du présent essai est d'inciter à vérifier si les automatismes en place s'inscrivent dans une structuration hiérarchisée et répondent aux exigences de cohérence et de complétude.
NB. Aussi bien le vecteur d'état que la commande sont soumis à la vérification de cohérence, par exemple la pression statique doit correspondre au niveau de vol autorisé.

Automatisation basée sur le modèle



NB. Le schéma ne fait pas apparaître les diverses rétroactions.

Les règles de conduite du vol sont les mêmes pour tous les aéronefs, indépendamment de leurs caractéristiques matérielles, par conséquent des algorithmes de conduite génériques peuvent être élaborés. L'automatisation peut prendre en compte cette approche. Au plus haut niveau de mode de conduite le robot utilise des algorithmes génériques pour assimiler après vérification les ordres reçus du contrôle de la circulation, ou les directives opérationnelles reçues de la compagnie, pour rechercher des informations sur le contexte dans des bases de données, et en déduit les manœuvres à effectuer. Ces manœuvres sont demandées à un modèle spécifique de l'appareil qui les exécute avec les commandes disponibles et selon les caractéristiques mesurées ou calculées du moment tant de l'appareil (masse, centrage) que du contexte. Ce modèle spécifique est mis à jour avant le départ.

Les algorithmes génériques optimisent les manœuvres dans l'espace d'état généralisé en puisant dans le modèle spécifique les paramètres nécessaires. La complétude du vecteur d'état généralisé exige de pouvoir prendre en compte des paramètres non physiques, tels que des probabilités d'événements, ou des indices de risques. Une telle optimisation sous contraintes variables avec un grand nombre de paramètres n'est pas simple et relève de mathématiques de haut niveau.

Les algorithmes génériques traitent des objectifs et résultats, alors que les spécifiques traitent des moyens. Le transit par les algorithmes génériques permet de surpasser la diversité des modèles d'appareils et d'envisager le « pilote générique » pour la reprise en mains depuis le sol.

Place et rôle de l'équipage

Organisation classique

L'examen du fonctionnement du système a conduit à considérer un « équipage élargi » qui comprend tous les acteurs impliqués, au moins momentanément, dans la conduite du vol.

Ces acteurs sont

- à bord,

. les professionnels usuellement désignés comme « équipage » ; dans le fil du présent essai il existe au moins un opérateur en mesure d'agir sur les robots et automates. S'y ajoutent les personnels non techniques.
. l'analyse en cours conduit à introduire la « machine » comme partie de l'équipage
. la cargaison, pouvant être des passagers ou du fret.

Sauf les cas, en fait rares, d'incidents majeurs (à bord ou au sol) l'exécution du vol proprement dit est, sinon simple, du moins assez linéaire. En revanche toute la phase au sol préliminaire est généralement émaillée de problèmes mineurs (passagers, fret, avitaillement) ou gênants (encombrements, dégivrage) demandant des décisions d'opportunité pour lesquelles l'humain paraît irremplaçable.

- au sol,

. le régulateur (appliquant la réglementation) qui peut intervenir à chaque instant pour contrôler les conformités, en pratique limité à la phase de préparation du vol,

. le gestionnaire (représentant les actionnaires), dans la pratique le CCO,
. le contrôleur de la circulation (aérienne ou au sol),
. les services divers dont ceux fournis par l'aéroport (phase de préparation).

Il résulte de cette organisation un impératif : tous les acteurs, à bord ou au sol, doivent « voir la même chose » quant à la situation interne et externe à l'appareil, notamment pour le CTA sur la météo et le trafic. Le CTA « voit » dans son référentiel sol, le pilote « voit » dans son propre référentiel mobile ; une présentation « jeu vidéo » en 3D peut faire la synthèse.

Les notions de management des ressources, de décision coopérative, se transposent aux différentes phases pendant lesquelles chaque acteur est impliqué. L'automatisation de la partie sol doit être considérée : elle se traduira par la production d'instructions sous forme numérique pouvant être directement injectées dans les robots de conduite du vol. Le développement de cette perspective dépasse le présent essai.

A mesure que l'automatisation progresse, que l'amélioration des prévisions météorologiques fiabilise les plans de vol, que la connaissance détaillée de l'état des machines par le sol évite les incidents techniques, qu'en somme le vol devient banal, l'autorité sur la conduite du vol va inévitablement de plus en plus à la partie sol de l'équipage.

La composition et les qualifications de la partie humaine embarquée de l'équipage relèvent d'une problématique complexe. Elles dépendent, sous les contraintes réglementaires, de la façon dont les liaisons entre les acteurs sont organisées et réalisées, en particulier la répartition des rôles et fonctions à bord, de façon à atteindre les objectifs de sécurité et de rentabilité économique, et plus généralement de l'objectif industriel.

À ce titre il serait intéressant de revenir sur l'historique qui a conduit au poste à doubles commandes, de pilotes redondants à pilote/copilote, PF/PNF, acting/monitoring, et sur la justification des cas de monopilote.

Dans la pratique la composition et l'activité de cette équipe primordiale varient en fonction de nombreux facteurs :

- Selon la taille de l'appareil (effectif de la cargaison),
- Selon la méta mission (durée, zones), l'éloignement des centres
- Selon la phase du vol (évolutive près du sol, croisière), l'encombrement de l'espace
- Selon ce qui peut être fait depuis le sol (observation, écoute, conseil, commandes)
- Selon l'extension de l'autonomie du bord (capacité de récupération, d'autoréparation, …)
- Selon ce qu'on peut exiger de l'humain (physiquement et socialement).

On voit que de facto les dispositions effectives seront toujours très variées, même si l'automatisation conduit à de nouveaux types d'intervenants humains.

Qui conduit le vol ?

Le vol est conduit par l'équipage à condition de considérer qu'en font partie avec un rôle majeur le robot et le contrôleur aérien. Sans revenir sur le cas du robot, il convient d'insister sur le fait que dans certains cas c'est le contrôleur qui conduit le vol, typiquement en phases d'approche et terminales. La procédure de « radar-vectoring » n'est autre qu'une conduite par trajectoire, l'opérateur embarqué pouvant soit exécuter en mode 2 soit transposer en mode 3. Deux difficultés doivent attirer l'attention. Primo le fait que le contrôleur conduit en réalité un essaim d'appareils, et que des automatismes intrusifs ne doivent pas provoquer des déviations individuelles conduisant au chaos dans l'essaim. Second la problématique du référentiel, le contrôleur devant conduire les appareils selon une route au sol (manœuvre) tout en donnant des ordres dans le référentiel air (trajectoires). On voit l'intérêt de normaliser une conduite par manœuvre, ce qui nécessite le calcul prévisionnel des manœuvres à prescrire (effets météo), puis ouvre la voie à l'entrée numérique directe dans les robots embarqués.

Avec une automatisation très poussée (mode 5) on conçoit d'aboutir à la présence à bord d'un gestionnaire opérationnel n'ayant plus la capacité de conduire le vol. Un robot peut assez facilement assurer le retour en approche mais la manœuvre finale peut exiger une intervention en mode 2 qui devra venir d'un opérateur terrestre.

Impact de l'automatisation : un seul ou sans pilote ?

Dans la vision quasi-populaire de l'automatisation la conséquence en est la suppression du pilote ; on a conclu qu'il n'en est rien.

En revanche grand bruit est fait autour du concept de « monopilote » se substituant au pilotage à deux. Cette unicité de pilote (très classique) fonctionne dans des cas réglementés (essentiellement faible taille et courts trajets).

La question se pose en deux termes : nombre de pilotes en poste de commande et nombre de pilotes à bord avec des conséquences sur la composition de l'équipage embarqué. Ce dernier dépend du premier et de la durée du vol. Sur les vols suffisamment courts il y a égalité, et par conséquent réduire le nombre de pilote revient au monopilote, avec des conséquences sur la fiabilité. Dans ce cas (et hors malveillance) on a vu comme possibles :

- périodes en « mode drones » : sur longs courriers, périodes (tout l'équipage au repos) de conduite par un robot substitut (large autonomie face à l'inattendu) sur une mission partielle avec supervision à distance par un centre dédié (service de la compagnie ou sous-traitance). Si les trajets transocéaniques se prêtent bien à cet exercice le survol de certains pays est, à ce jour, notoirement plus compliqué. Par conséquent il s'agit d'une vision prospective. Le premier impact de l'automatisation est d'ouvrir des possibilités.

- périodes ou vols en pilote unique, (sur longs courriers pendant que les autres sont au repos,). C'est alors la conception même de la conduite du vol à deux qui est en cause, qu'est-il demandé à chacun, pourquoi faut-il faire appel à un second intervenant selon les phases de vol ou les urgences ? il n'y a pas de réponse intemporelle, il faudra s'adapter au niveau progressif d'automatisation, jusqu'à la validation de robots substituts capables de la méta mission.

Cas particulier le robot de déroutement forcé ou de sauvetage

A la suite de divers cas d'indisponibilité de l'humain représentant l'équipage à bord, et quelle qu'en soit le motif, il est proposé régulièrement de remettre la conduite du vol à l'autorité intangible d'un robot, capable de la mission « rejoindre un terrain donné » de façon autonome. À une échelle plus réduite un tel dispositif est installé sur des drones. L'autonomie doit s'entendre comme relative. Le robot devra toujours s'informer auprès de sources extérieures. En cas de déroutement forcé pour contrer une intrusion malveillante le robot devra être intangible. S'agissant d'une situation extrême des mesures spécifiques sont alors mises en œuvre par les entités de contrôle de l'espace aérien autorisant une simplification du programme de l'automate, mais une reprise en mains du pilotage en finale depuis le sol semble inévitable.

Élimination des commandes classiques

L'espace et la médecine ont fait progresser la miniaturisation et la fiabilité de systèmes de commande complexes. L'une des retombées a été le progrès de la télécommande. Déjà présente, sous une forme fruste, dans l'aéromodélisme et les jouets, la télécommande d'objets volants de faibles dimensions est passée à un niveau de capacité assez élevé avec la prolifération de ce qu'on appelle couramment « drones ». Il s'agit pour l'instant dans la pratique de « voilures tournantes » à 2n rotors.
Il est exclu de piloter ces engins par « braquages », c'est-à-dire directement par réglages différentiels des rotors. La console de commande envoie des ordres de ce genre élaborés à partir d'une commande simple. Compte tenu de la faible inertie et du mode de sustentation/propulsion, la phase « évolution » est écrasée, et la commande porte sur une « trajectoire ». S'ajoutent certainement des automatismes de maintien en position par rapport à un repère matériel, ainsi que la programmation de trajets et de

missions (par exemple balayage d'une aire) comme sur les engins agricoles (guidage GPS), et aussi un programme de retour automatique au point de départ.
Parallèlement la technique des commandes de vol électro-numériques sur les avions de transport a fait s'effacer la notion de distance entre le pilote et l'appareil. On voit bien que le pilote conduit son avion par l'intermédiaire d'une « boîte » qui transforme ses actions en émission de flux de données. À la limite le pilote pourrait être n'importe où avec une télécommande, sous réserve du retour d'informations sur l'effet de ces actions.
La conduite selon le processus « drone » s'assimile à celle des jeux vidéo (largement utilisée par les militaires), et s'inscrit dans la culture des nouvelles générations. Le pilote de drone, qualifié selon une formation réglementée, se considérera capable de conduire un « p-plane » de la même façon que ses drones, simplement en étant à l'intérieur du dit drone.
Sous la protection permanente de l'anticollision, de l'anti-CFIT, des limitations au domaine de vol, réputées fiables et prenant en compte un vecteur d'état généralisé, en cas d'incident il semble que la première action de pilotage soit de poursuivre la trajectoire en cours. La « reprise en mains » en « sautant » sur les commandes classiques semble avoir eu trop souvent des conséquences déplorables.
Dès lors que les modes de conduite par braquages et par évolution sont dépassés et que le mode trajectoire est le mode minimal mis en œuvre, la présence du manche (classique ou latéral) et autres « manettes » ne s'impose plus. Le poste de commande se ramène à celui d'un drone (RPAS : piloté à distance). Les commandes classiques ne sont plus qu'un secours, et peuvent être une petite console unique n'apparaissant qu'en cas de besoin. C'est une re-conception complète du poste de commande qui se profile ainsi, le modèle étant probablement proche du poste de contrôle du Neuron.
Le concept de double poste de commande a-t-il vécu ? Seul le pilotage par évolutions justifie la redondance des « manettes ». Le mode normal peut être systématiquement au moins commande de trajectoire. Dès lors un seul poste de commandes classiques suffit en secours.

Mais, construira-t-on deux modèles, dont un à double commande pour les essais et la formation ?

NB. La phase de reprise de contact avec le sol pose des problèmes de trajectoire et d'équipements (sol et bord) qui ne sont pas ignorés mais ne seront pas discutés ici. Les pionniers atterrissaient de nuit à l'aide de trois feux, cela devrait être transposable avec la technique GNSS basée sur trois (ou quatre) balises pseudo satellites. Un investissement matériel relativement modeste devrait permettre d'équiper tous les terrains commerciaux, permettant des approches de précision et atterrissages par la plupart des aéronefs. En outre, dans certaines zones à très fort trafic, certains aéroports pourront offrir un service de télé pilotage pour l'atterrissage.

CONCLUSION

Attendus

Le *momentum* du système de transport aérien est extrêmement élevé. Il en est ainsi de l'automatisation. Il est clair qu'à l'aune du paradigme du profit beaucoup d'éléments poussent à l'automatisation. Outre que la sécurité est indispensable à l'économie, l'automatisation promet beaucoup à ce propos. L'apport à la sûreté est moins évident, mais exploitable.

L'automatisation ne peut avoir pour but l'élimination de l'opérateur humain. En effet comme le montre une comparaison poussée l'homme et la machine sont irréductibles l'un à l'autre. Par conséquent l'homme et la machine, embarqués, doivent « faire équipage ». L'équipage complet comporte, en fait dès à présent, une ou plusieurs parties au sol, et cela s'accentuera. En appelant « pilote » le décideur on constate que :

il y a nécessairement quelque part un « pilote » qui prend les décisions nécessaires.

et il y a toujours un pilote……au sein d'un équipage.

Il reste toujours un décideur qui doit lancer l'activité de la machine (robot, automate, calculateur, régulation), soit directement soit par l'intermédiaire d'un programme d'ordre supérieur.

Dans ces conditions le principe a été retenu selon lequel :

Il y aura toujours à bord une représentation de l'équipage, de même nature que la cargaison, représentant du transporteur, habilité à intervenir dans la conduite du vol et partageant le sort des passagers. On pourra l'appeler Commandant de Bord.

NB. On fait ici abstraction des considérations sociétales qui impliquent la présence à bord d'une autorité régnant sur le « village aérien » constitué par des centaines de personnes enfermées pendant des durées importantes (autonomie de 19 heures !). Et on néglige l'impact de robots humanoïdes dans ce contexte.

La possibilité technique de faire conduire la mission complète de transport (méta mission) par des robots substituts, suffisamment autonomes pour assurer un retour même par déroutement, ce que peuvent réaliser déjà des prototypes militaires, conduit non pas à supprimer l'opérateur humain mais à en redéfinir les fonctions et compétences, avec pour corollaire le réaménagement du poste de commandes.

Du fait du *momentum* les appareils en service sont très divers en termes d'automatisation, et un jeu d'options complique encore le tableau. La règlementation se contente (si l'on peut dire) de certifier des adjonctions ou modifications, conservant l'effet mille-feuilles. En ébauchant ce qui pourrait constituer une approche systématique plus rigoureuse et universelle on a essayé de donner des pistes pour sortir de cette voie, dont on voit mal l'aboutissement à long terme.

Du même effet d'inertie par la formation, le recrutement, la notion de carrière, il résulte une concomitance obligée des niveaux de compétences et donc de leur utilisation. Tout un système a été mis en place sur la base du pilote humain réputé capable d'assurer toutes les phases de vol, tous les modes de commande, toutes les résolutions de crises connues. Au plan des principes il est facile de sélectionner, former, entraîner, contrôler les opérateurs humains, alors que la preuve formelle des qualités d'un logiciel échappe encore le plus souvent.

Ce déséquilibre est parfois mis en défaut par l'incertitude sur l'humain, le dilemme :

l'Homme n'est pas sûr, la machine n'est pas intelligente, n'est pas encore bien résolu.

L'extension de l'automatisation du vol ne se fera pas sans un développement d'une automatisation dans les domaines connexes, principalement du contrôle de la circulation.

Le « phénomène drones » aura pour conséquence que les dispositifs imaginés pour ces appareils et les mesures réglementaires qui leur seront imposées, après uniformisation internationale, seront transposés à tous les aéronefs.

Les modalités d'informations réciproques utiliseront l'extension des interconnexions à grande échelle de par le monde entier.

Les évolutions des organisations industrielles et des services de navigation devraient faciliter l'adoption de standards ou normes communes favorables à l'extension de l'automatisation.

Refonte du système : Considérant de plus que des optimisations individuelles ne conduisent pas à l'optimum global on est conduit vers une centralisation de l'élaboration des missions et manœuvres, soit une vision d'un opérateur unique pour l'ensemble des réseaux, muni d'outils automatiques de décision. Cette vision d'une refonte du système dépasse l'horizon du présent essai.

Préconisations

L'automatisation n'est pas bien curative, en revanche elle peut être préventive. Il y a donc lieu de pousser au maximum la prévention pour ramener les cas d'impuissance à un très faible niveau de probabilité. Cette approche pourrait être un guide permanent.

Il y a lieu de construire d'abord un système minimal doté d'une fiabilité supérieure permettant un recours constant dans les situations critiques. L'intégration de la machine dans l'équipage a pour conséquence

que l'IHM devient partie intégrante du CRM. En particulier, l'abandon de poste par le pilote automatique ne doit exiger du partenaire humain, ni actions physiques anormales, ni éclair d'intelligence supérieure. En cas de crise les automatismes doivent fournir à l'opérateur humain, seul capable de la résoudre, une vision synthétique de la situation et lui permettre une commande synthétique de trajectoire.

La conception de cette vision et de cette commande parait être une condition première d'une évolution vers un avion autonome contrôlé par un décideur embarqué dont la compétence sera dans la maîtrise de la situation et non dans l'habileté à manœuvrer des dispositifs variés.

Il apparaît souhaitable de lancer en Europe un programme d'ampleur et de longue durée, comportant des démonstrateurs, sur le thème de l'automatisation de la conduite du vol, avec comme lignes directrices :

- l'universalité des solutions démontrées
- leur acceptabilité et leur implémentation industrielle au niveau mondial
- la construction progressive du système par niveaux (standards) homogènes normalisés.

Au stade précompétitif l'automatisation pourrait être le thème d'une coopération largement internationale, de façon à aboutir à des concepts identiques et des exigences communes, facilitant l'exploitation humaine.

L'objectif synthétique et de long terme serait :

Un avion tout automatique est un drone autonome dont le contrôleur ultime est à bord.

En effet aussi autonome qu'il soit, un appareil (habité ou non) n'est jamais (normalement) laissé sans surveillance.

Le « chantier drones » est immense, par suite il faut prévoir au moins 25 à 30 ans de travaux avant d'aboutir. Il faudra cependant admettre que la diversité des conditions de par le monde maintiendra très probablement une fraction du trafic en régime semi-automatique.

À court terme : à chaque nouveau programme ou standard du système, évoluer vers l'objectif unique à long terme. S'assurer que les hommes comprennent chaque fois un peu mieux le système (la machine).

Un soin particulier portera sur la diversification redondante des informations fournies à l'opérateur (humain ou machine), qu'elles soient d'origine interne ou externe. La considération d'un modèle global traitant des vecteurs d'état généralisés devrait à la fois assurer la cohérence et la permanence de données utilisables même en cas de crise, et permettre de donner à l'opérateur à la fois une vision globale et les moyens d'une action synthétique, ne nécessitant plus à l'extrême l'habileté manuelle associée à la puissance cognitive.

Le poste dit de pilotage doit faire l'objet d'une re-conception avec, à terme, la disparition simultanée du double poste et des commandes traditionnelles.

Compte tenu du *momentum* du système, les robots (substituts au sens de l'essai) de conduite de l'avion automatique (équivalent à un drone autonome) seront d'abord installés sur des appareils plus classiques (prochaine génération) pour être mis à l'épreuve en « double-commande ». Les opérateurs disposeront à leur gré des deux modes, « classique » et « robotisé ».
Ces appareils « mixtes » permettront la transition : maintien d'une compétence de pilotage « manuel » minimale aussi longtemps que nécessaire, la formation à la conduite du vol par l'intermédiaire de robots (délégués puis substituts), la mise au point et la qualification (certification) des dits robots par « apprentissage » sous le contrôle d'opérateurs humains expérimentés.
Prévoir une (longue) phase d'utilisation de l'automate total en ligne, de façon à détecter les défauts ; ainsi les utilisateurs seront associés au développement, et les millions de vols annuels seront autant de tests réalistes. Les opérateurs seront formés de façon traditionnelle et ajouteront la compétence et l'expérience de la commande des robots, pour finalement devenir uniquement contrôleurs de ces robots. Ce processus s'assimile à une « formation » progressive des robots, jusqu'à les rendre capables de subir les tests en vol imposés aux humains, et ainsi qualifiés selon une réglementation être certifiés pour

emploi. Les techniques de « deep learning » seront à même d'intégrer l'expérience en vol aux logiciels des robots.

Seul l'aspect générique de l'évolution est ici proposé, mais d'autres éléments doivent être pris en considération, en particulier l'attribution de responsabilité dans les phases « drone » (en présence d'un opérateur on retrouve pratiquement la situation actuelle envers le pilote).Plus généralement l'ébauche ici présentée devra être complétée par l'analyse des questions de société, de réglementation, de certification, et des aspects juridiques (internationaux) sans omettre la composante économique.

Perspectives

À relativement court terme le régime de « monopilote » devrait s'étendre modérément (appareils plus gros, courts trajets) grâce à la généralisation des automatismes, dans la mesure où ces dispositifs répondront au principe de « faire équipage ». Le mode de conduite par trajectoires (automates) sera progressivement standardisé.

À moyen terme :

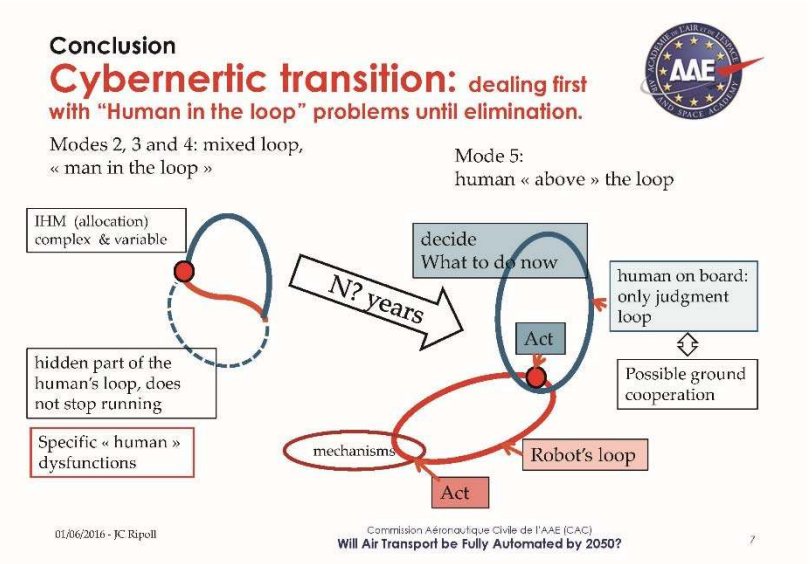
- extension du monopilote aux dessertes favorisées, dans des zones densément et bien équipées permettant la réussite d'un déroutement entièrement automatique avec prise en mains par le sol en fin d'approche. La formation d'opérateurs expérimentés pour ces dessertes se fera sur les autres dessertes.

- le mode de conduite par manœuvre sera à son tour standardisé (robots délégués) ; sa puissance permettra les évolutions de la formation des personnels et de l'organisation du contrôle de circulation.

- validation de périodes en « mode drone » sur les longs courriers, avec réduction du nombre d'opérateurs embarqués et distinction entre temps en vol et temps de travail.

À long terme :

- validation des « robots » de tous niveaux, disparition pratique du « pilote manœuvrier » à bord, CDB décideur opérationnel. Sous réserve d'une évolution parallèle et cohérente de l'ensemble du système.



La structuration strictement hiérarchisée du système passera de la boucle mixte humain/machine dont on a vu la complexité de fonctionnement, à une hiérarchie de « boucles » de niveau d'intelligence croissant, la boucle humaine réservant les fonctions inaccessibles à la machine de jugement et décision hors programmation.

Il ne faut pas négliger les enjeux et même défis que représente l'évolution des opérateurs vers les seules fonctions d'intelligence de haut niveau, en ce qui concerne les processus de sélection, formation, certification, gestion de carrière, dans un domaine aussi international que le transport aérien. Sans nécessairement connaître intimement la « physiologie » du système automatisé, les opérateurs devront en maîtriser pleinement la logique de comportement.

Même munie d'une théorie, l'automatisation de la conduite du vol est une affaire très complexe.

Livret 4 : FAUT-IL des PILOTES à BORD ?

Jean PINET (Membre de l'AAE)

1ère partie : BASES et LIMITATIONS de la REFLEXION

L'évolution

Il s'agit de réfléchir à ce que deviendra l'aviation de transport dans les prochaines décennies, et plus particulièrement dans ce livret 4 au rôle que les Humains pensent devoir assigner à leurs représentants chargés de conduire et de gérer opérationnellement les machines les transportant dans les airs. L'objectif de 2050 semble un peu trop proche pour représenter les bases d'une évolution bousculant de nombreuses idées établies, et la deuxième moitié du siècle serait plus appropriée

Depuis longtemps les humains s'efforcent de répliquer ou de complémenter leur comportement dans des machines pouvant les aider, ou les remplacer, dans des missions et des tâches de plus en plus complexes et difficiles, grâce à des automatismes, des robots et aujourd'hui des drones.
Actuellement les progrès techniques autorisés par la technologie digitale sont tels qu'on en vient à suggérer que le raisonnement humain, sinon la pensée, pourrait être remplacés avantageusement par une « intelligence artificielle », sujette à la logique sans état d'âme, donc en théorie exempte d'erreurs de perception de situation ou de jugement.
L'engouement du public pour cette idée est favorisé par l'aide à l'information et la communication que lui procurent les formidables équipements miniaturisés utilisés mondialement. L'extension de cette interconnexion planétaire semble sans limite au constat de l'accélération des ambitions des entreprises tout aussi planétaires, Google, Facebook, etc.
Certaines de ces dernières s'attaquent dorénavant au transport sans intervention humaine, mais prudemment au sol où l'on peut s'arrêter si nécessaire, avec des dégâts limités.

En aéronautique l'avancée est prudente et pour les machines pouvant éventuellement transporter des humains ; les premiers essais portent sur des véhicules de dimensions modestes, hélicoptères et petits avions. Ici l'automatisme est bien connu depuis son tout début, et l'évolution amène à se poser trois questions basiques :

- Jusqu'où peut-on aller dans l'automatisation, aujourd'hui et demain ?
- Y a-t-il des facteurs-clés de cette évolution ?
- Que devient le rôle des Humains dans l'exercice des tâches ?

Le colloque de juin 2016, « Le transport aérien sera-t-il tout automatique en 2050 ? », a permis de lever un coin du voile recouvrant ces trois questions, et ici on essaiera de traiter ces questions dont les réponses ne peuvent qu'être des hypothèses à vérifier dans le futur.

Ainsi, observant l'évolution des automatismes assurant des fonctions de plus en plus complexes, on ne peut s'empêcher de réfléchir à l'évolution des espèces mise en lumière par Charles Darwin. Là, l'environnement contraignant oblige les organismes à s'adapter pour survivre. L'énorme différence de l'évolution humaine actuelle, est que les humains ont acquis désormais la possibilité de modifier volontairement ou non leur environnement planétaire, ce qui rend difficile l'estimation de l'évolution de leurs œuvres.
Cependant la comparaison, peut-être osée, entre l'évolution des ensembles d'automatismes, surtout chez les robots, et celle des espèces animales, permet une sorte de « cotation relative de l'intelligence ». Disons qu'aujourd'hui on n'a réussi qu'à arriver partiellement au niveau d'un mammifère inférieur, encore très loin du nôtre.
Car notre cerveau reste une référence formidable, mais à déchiffrer.

Le comportement opérationnel

S'attaquer à l'automatisme remplaçant l'humain n'est pas sans ambiguïté dans la réflexion tant est vaste le domaine où se manifeste notre activité mentale. Aussi essaierons-nous de rester dans le domaine du comportement opérationnel humain bien que ce comportement ait parfois des liens avec bien d'autres domaines, par exemple avec le comportement affectif et la responsabilité. Cette limitation volontaire « d'ingénieur », pas toujours possible, a l'avantage de simplifier les mécanismes mentaux à traiter, donc de permettre d'avancer dans la connaissance de leurs facteurs dominants.
C'est donc sur le terrain du comportement, plus particulièrement **avec le choix volontaire de prendre pour base celui de l'Humain**, que nous aborderons le problème de la diminution du nombre de pilotes à bord des aéronefs.

La connaissance du fonctionnement du cerveau progresse à pas de géant, au point de penser possible de mettre en parallèle les deux évolutions, celle des automatismes et celle de la connaissance du comportement cognitif du cerveau.
Il faut convenir qu'il existe une similarité irréfutable, même si elle n'est qu'approximative, entre notre comportement mental et celui de certaines machines que nous inventons (voir tableau1), ainsi qu'entre nos perceptions dynamiques et des concepts mathématiques tels que dérivée et intégrale que nous évoquerons plus loin.

Pour les automatismes on ne peut rester indifférent aux évolutions actuelles des connaissances spéculant sur l'intelligence artificielle forte, voire sur une superintelligence artificielle, sur la combinaison des capacités de calcul des ordinateurs et calculateurs, devant atteindre celle d'un cerveau humain vers 2025 d'après la loi de Moore, et de l'utilisation du « deep learning » de Google, IBM et les autres. Possible, impossible ? Il faut cependant remarquer que la capacité de calcul ne suffit pas pour être intelligent ; il faut savoir l'utiliser en efficacité et sécurité, et c'est évidemment là que réside la difficulté dans la compétition avec l'Humain.
Si les humains ne se privent pas de rêver, on restera comme déjà dit dans le registre moins spéculatif de l'opérationnel.

D'où la proposition inversée, probablement surprenante mais assez réaliste, et tout aussi probablement motivante pour des ingénieurs, de considérer **l'Humain opérationnel** comme un automatisme de (très) haut niveau intégrable dans l'ensemble opérationnel de la conduite et de la gestion des avions, avec ses caractéristiques et ses limitations physiques, physiologiques et mentales. On ne parlera ici que des opérations dynamiques où le temps joue le rôle limitatif essentiel dans le mélange des actions humaines et matérielles.
Ce concept de l'Humain opérationnel proche de l'automatisme de haut niveau, pouvant paraître choquant, est implicitement utilisé dans les analyses qui suivent. Il s'impose de lui-même dès qu'on parle des fonctions assurées par les pilotes et des caractéristiques et limitations du comportement opérationnel humain. Quelques analogies schématiques sont montrées sur le Tableau 1 suivant.

Tableau 1

Humain <=	**=> Matériel**
• Traitement neurologique	• Traitement physique/informatique
• Agent cognitif : assigné à une catégorie d'actions spécifiques (pilotage manuel, navigation, communication…)	• Calculateurs spécifiques à une fonction type (commandes de vol, FMS…)
• Objectifs d'un Agent	• Fonctions de base d'un calculateur
• Tâches d'un Agent	• Fonctions élémentaires d'un calculateur
• Fonction cognitive de l'Agent associée à une tâche	• Fonction de transfert associée à une fonction particulière du calculateur / logiciel
• Modèles mentaux	• Logiciels mémorisés
• Mémoire long terme	• Disque dur
• Mémoire de travail, à court terme	• Mémoire vive
• Capteurs sensoriels (vision, toucher, audition …)	• Capteurs physiques

Deux super- agents

Exactement il s'agit de considérer l'ensemble avion + pilote(s) comme l'ensemble indissociable de deux super-agents.
Ainsi schématiquement la conduite d'un avion est gérée par deux ensembles d'agents, les deux super-agents, se partageant les tâches nécessaires à la mission et travaillant en coopération.
Le premier est **l'équipage humain**, les pilotes où qu'ils se trouvent (à bord ou au sol). Le deuxième est l'ensemble des automatismes en tous genres, en fait l'ensemble des **prothèses**[114] permettant de relayer et d'assister le premier super-agent dans les fonctions physiques **et mentales** assurant la mission de cet avion, c'est-à-dire **le faisant vivre**.

Leur interfaçage est assuré à bord par un cockpit, complété éventuellement par d'autres postes de travail au sol, conçus pour s'adapter aux caractéristiques humaines dans les fonctions de commande et de contrôle. En fait ils doivent être adaptés aux performances et aux limitations des deux agents.
Et surtout, pour que la coopération, la communication entre eux deux s'effectuent correctement, ils doivent se comprendre dans une confiance mutuelle. On adopte volontairement un ton anthropocentriste pour cette exigence puisqu'on accorde de plus en plus d'intelligence aux automatismes, qu'elle soit artificielle, faible ou forte.

Ethique et responsabilité

Cependant cette instrumentalisation de l'Humain oblige à la considérer aussi du point de vue de l'éthique ce qui ne va pas de soi pour les partisans de l'éviction totale du pilote au profit du tout automatique.

[114] Sujet traité dans la 3ème partie

Bien que ne s'appliquant pas exactement aux mêmes sujets, le souci de l'éthique est clairement développé pour la robotique dont le domaine est très proche de celui des drones et par conséquent de celui nous intéressant ici comme le montre le rapport n°1 de la CERNA de novembre 2014[115].
Mais l'éthique n'est pas le seul concept de haut niveau à regarder de près. Un autre plus concret et directement tangible est celui des responsabilités, de leur partage au sein des actions complexes menées de concert par les ensembles humains et matériels. Par exemple quelle serait la responsabilité d'un matériel autonome impliqué dans un accident, ou celle d'un humain intervenant du sol ?

Notre réflexion

De nombreuses études ont déjà été publiées sur l'évolution des automatismes, des automates, de l'autonomie, de la réduction des équipages à bord. Certaines seront évoquées. De façon permanente les bureaux d'études planchent sur ces sujets et il n'est pas question ici de se substituer à eux. En revanche nous essaierons d'émettre une opinion neutre et objective sur les tendances observées d'une évolution dont les fondements sont surtout techniques et financiers, éléments difficiles à combiner avec éthique et responsabilité.
Et surtout nous montrerons les obstacles à franchir nécessairement dès lors qu'on désire s'affranchir de l'Humain embarrassant.

Nous évoquerons successivement :

- Les spécificités de l'Humain dynamique
- L'état des lieux de la coopération des deux super-agents
- Les conditions d'une diminution de l'équipage à bord
- Les perspectives devinées d'une évolution de la coopération.

Remarques importantes

Il ne s'agit dans ce document d'aucune critique vis-à-vis de ce qui a été réalisé jusqu'à aujourd'hui, l'ensemble des acteurs ayant utilisé ce que l'expérience, la science et la technologie pouvaient leur donner de meilleur compte-tenu des moyens disponibles et de leur environnement, et la sécurité a constamment fait l'objet d'une attention scrupuleuse.

Le sujet traité est circonscrit à la conduite de l'avion.

2ème partie : L'HUMAIN OPERATIONNEL

L'automatisme intelligent humain

Cadre d'utilisation

Dans la comparaison entre les deux super-agents, l'un, matériel, celui des prothèses, bénéficie du consensus mondial sur les sciences dites exactes. Cependant l'autre, malgré l'avancée constante des connaissances, reste auréolé du flou des sciences dites humaines. Ce chapitre a pour objectif d'essayer de consolider la logique de l'Humain confronté aux obligations d'un comportement dynamique de faible constante de temps, disons inférieure à quelques minutes, souvent quelques secondes.

[115] CERNA, Commission de réflexion sur l'Ethique de la Recherche en sciences et technologies du Numérique d'Allistene (Alliance des sciences et technologies du numérique)

L'Humain conserve encore des zones d'ombre dans certains domaines, ombre se dissipant rapidement mais toujours participant à l'idée d'une incertitude sur ses caractéristiques à prendre en compte. Pour des techniciens, ingénieurs ou pilotes, l'Humain est complexe, peu quantifiable, et diffère d'un individu à l'autre, ce qui pour eux empêche toute possibilité de le concrétiser mentalement et opérationnellement dans un cockpit. Nous verrons que ce point de vue change rapidement.
En revanche on a bien enregistré ses caractéristiques physiologiques, on les a même quantifiées dans le cockpit. On a traité tout ce qu'autorise l'observation externe et interne, pour la vision et l'audition en particulier. Mais pour se mesurer avec le comportement mental interne inatteignable directement on a accumulé les observations sur un nombre impressionnant de facteurs plus ou moins bien corrélés, les « facteurs humain », qu'on utilise de façon pragmatique au gré des besoins. La psychologie classique est évidemment de mise tout en restant peu quantifiable.
Alors quand il s'agit d'intégrer les fonctions des automatismes avec celles des pilotes on a tendance à peaufiner les premières, physiquement aisées à traiter, plutôt que celles de l'Humain difficilement saisissables.

Cette situation évolue rapidement et pour le montrer on adoptera un point de vue un peu provocateur mais compréhensible par l'ingénieur : dans l'accomplissement des tâches opérationnelles dans le cockpit, le plus souvent **l'Humain agit comme un automatisme intelligent**. Cette affirmation a pour objectif de montrer qu'il devient possible de traiter son comportement opérationnel de façon aussi logique que les systèmes qu'il fabrique et dont il se sert, c'est-à-dire en considérant le cycle : *entrée => fonction de transfert (objectif du système) => sortie*, avec la multitude de boucles d'asservissement et leurs différentes constantes de temps, avec l'usage de multiples mémoires.
Cependant l'humain possède des capacités de choix et décision très largement au-delà du déterminisme des automatismes actuels, et que l'intelligence artificielle forte aura du mal à égaler, ou même à atteindre un jour en dehors de cas spécifiques d'objectifs limités.

Le propos restera cantonné au domaine restreint de **la conduite opérationnelle d'un aéronef**, ici avec l'aide de la psychologie-ergonomie opérationnelle qui devrait rapidement céder la place à la neuropsychologie.
Malheureusement pour nos problèmes les recherches en neurologie sont surtout basées sur l'étude de cas pathologiques[116] et peu sur les fonctionnements normaux du cerveau. Cependant les déficiences humaines constatées dans l'analyse d'accidents mériteraient d'être considérées d'un point de vue neuropsychologique car elles engendrent des victimes, à défaut d'être pathologiques. Un gros effort de rapprochement entre neuropsychologues, ingénieurs et opérationnels, est à mener. Il est encore victime de la sectorisation de la recherche.

Donc la démarche suivie ici est volontairement celle d'un ingénieur, obligé de simplifier sans se départir de la réalité, souvent aussi obligé de sectoriser la multitude de paramètres impliqués au prix d'une nécessaire synthèse finale, afin de traiter des phénomènes complexes. Ce qui suit sera évidemment transformé par l'augmentation rapide des connaissances en neuropsychologie, mais devrait déjà permettre de mieux traiter l'intégration Humain-automatismes.

A l'appui de cette théorie de l'Humain automatique on peut déjà citer les oscillations pilotées (*PIO, Pilot Induced Oscillations*), phénomène connu depuis longtemps de résonance entre les caractéristiques dynamiques de l'avion et celles dynamiques du pilote, de période entre 0,1 et 2 Hz, pouvant survenir sur chacun des trois axes tangage, roulis, lacet. Ces oscillations cessent dès que le pilote réalise la situation (quand il le peut), soit en se maîtrisant et en contrant le déphasage de ses actions, soit en lâchant les commandes. Ce fait confirme la présence d'une possibilité « non déterministe » d'adaptation humaine à une situation critique, bien que la décision de lâcher les commandes implique le très difficile choix d'interrompre une action, ce qui est contraire à la tendance naturelle de l'automatisme humain d'essayer de « maîtriser » à tout prix une situation critique. Seul un choix mental fort peut amener la

[116] Agid, Y. (2013). *L'homme subconscient*. Robert Laffont. Paris

correction. Cependant il faut noter que ce phénomène désormais bien connu est pris en compte par les bureaux d'études dans la conception des prothèses en cause, les commandes de vol, mais il survient encore de temps en temps de façon imprévue (par ex. Flight American Airlines 587 en 2001, début du cas AF447 en 2009).

L'analyse de cas où les pilotes sont soumis à de fortes contraintes mentales, par exemple face à un inattendu dangereux ou dans une phase de vol difficile, permet de mieux connaître leur fonctionnement mental avec ses limitations. Au cours d'une mission l'attention des pilotes est imposée par l'importance des tâches et la nécessité de les accomplir correctement. Cependant une grande part de la mission ne requiert pas un niveau maximum d'attention, surtout lorsque l'autonomie de l'avion pourvoit à des tâches ne nécessitant qu'un contrôle périodique, comme la croisière en altitude en météo calme. En revanche dans les autres circonstances, et surtout face à l'inattendu, le comportement des pilotes est entièrement concerné par la résolution de problèmes et c'est là qu'on observe une grande similitude dans les comportements individuels[117]. Cette observation est importante car elle limite considérablement, hors cas pathologiques, l'éventualité de causes mentales perturbatrices et autorise une généralisation humaine des comportements.
Ce qui suit est un bref résumé de caractéristiques essentielles. On constate que la logique de ce fonctionnement se rapproche de celle des automatismes. Mais, les équipements-prothèses ayant été conçus par des humains, est-ce une surprise ? N'est-ce pas à leur image ainsi que le montre le Tableau 1 ?

L'équation, l'algorithme de base

Voici le schéma observé.
Le comportement opérationnel est toujours associé à un objectif (par ex. une stabilisation d'altitude). Il suit deux chemins parallèles, l'un conscient dirigé vers l'atteinte de l'objectif et pilotant les actions nécessaires, et l'autre non-conscient (qualifié d'automatique par les psychologues ou subconscient par les neurologues) lui-même le plus souvent asservi aux actes conscients et à l'exécution de tâches associées.
La dynamique des actions est gérée par des **fonctions cognitives**[118] où :

- les **entrées** sont les perceptions,
- les **mécanismes mentaux**, les algorithmes, proviennent des modèles mentaux[119] fabriqués par la connaissance et l'expérience, stockés dans les mémoires ; ces algorithmes sont immédiatement utilisés pour aboutir à un **diagnostic**, lui-même immédiatement suivi d'un choix de solution avec lancement d'une **action,**
- les **sorties** sont les ordres de mouvement musculaire (yeux, mains, voix par ex.).

Seul le **comportement conscient** permet une évolution correcte vers l'objectif assigné par le pilote. Son schéma classique est :

=> perceptions + objectif => fonction cognitive (perceptions + modèle mental) => diagnostic/décision => action => perceptions (résultat) => contrôle => etc.

Suivant les tâches, simples et élémentaires ou complexes, la durée d'exécution de ce processus mental peut aller du 1/10 de sec à de nombreuses secondes. Cette durée dépend aussi, entre autres, de l'habileté mentale acquise par le pilote.
Le comportement conscient s'exécute en ***boucle fermée***, avec contrôle du résultat et correction éventuelle.

---

[117] Pinet, J. (2015). *Facing the unexpected in flight*. CRC Press, Taylor & Francis. Oxon UK
[118] Boy, G. (1998). *Cognitive function analysis*. Ablex. Westport : Greenwood Group
[119] Lecomte, P. & Wanner, J.-C. (2004). *Images et modèles mentaux : Conscience de situation*. http://www.academie-air-espace.com/upload/doc/ressources/Representations_mentales.pdf

Les **comportements non-conscients** peuvent être lancés par des ordres venant du pilotage conscient d'une action. Ils fonctionnent alors en ***boucle ouverte***. Par exemple dans l'interception d'altitude il se produit un enchaînement d'actions élémentaires conscientes telles que gestion de la vitesse en exploitant les indications de l'échelle de vitesse, puis la gestion de l'assiette longitudinale en exploitant l'échelle des assiettes, puis la gestion de la vitesse verticale en exploitant l'échelle de Vz, etc. Lorsque la vision consciente passe de l'échelle de vitesse à celle de l'assiette, la vitesse continue d'être pilotée mais de façon non consciente, lancée en boucle ouverte. En fait grâce au balayage visuel rapide des figurations elle est **recalée** quand la consultation consciente revient sur elle, un peu comme dans un orchestre un musicien se recale sur le chef d'orchestre grâce à un coup d'œil[120].
D'autres comportements non-conscients, lancés aussi par le pilotage conscient des actions, peuvent s'exécuter en **boucle fermée avec recalages fugaces conscients**. Par exemple le vol à vue avec les ailes maintenues horizontales de façon non consciente.

Une importante caractéristique humaine vient du placement de **façon séquentielle** de cette suite **dynamique consciente** d'actions cognitives sur le socle d'une mémoire particulière de **rétention limitée** (de 10 sec à 2 min environ, suivant la charge mentale), la ***mémoire à court terme***[121]. Toutes les actions mentales conscientes, même les plus brèves de quelques dixièmes de seconde, s'y placent en séquences successives de façon chronologique et « s'évaporent » en limite de rétention.
Cette mémoire nous autorise à observer l'évolution temporelle des évènements et situations, en intégrant les tendances détectées par les perceptions externes et internes, ce qui l'oblige à les éliminer au bout d'un certain temps pour ne pas être saturée. Mais à très court terme (< 1 sec) la « fabrication » de l'intégrale ainsi obtenue laisse la trace des évolutions des éléments temporairement stockés, exprimant ainsi leur dérivée temporelle c'est-à-dire la détection des variations et mouvements immédiats autorisant la prévision des **tendances**. Il est intéressant de constater à nouveau que le cerveau fabrique et utilise naturellement les notions mathématiques de dérivée et d'intégrale en fonction du temps.

Le court terme dangereux

Nous choisissons de nous concentrer sur un cas pouvant être considéré comme l'enveloppe de la plupart des situations humaines à risque : celui d'une **situation inattendue** pouvant surgir dans n'importe quelle phase du vol. Ce genre de situation inattendue, voire **imprévue** est considérée comme la plus dangereuse dans un vol, comme signalé dans le colloque AAE de 2011 « Le pilote de l'aviation de transport face à l'imprévu ». C'est la raison de son utilisation comme référence majeure dans ce qui suit et dans l'ensemble du livret 4.

On peut remarquer que ce cas concerne aussi la **reprise de conscience** suivant une phase de **perte de vigilance**.

Pour l'analyse nous retiendrons deux hypothèses vérifiées par l'expérience[122] :

- le pilote fonctionne alors comme un automatisme intelligent surtout dans les situations à évolution rapide ;
- dans de telles situations l'attention est utilisée entièrement à l'exécution des tâches opérationnelles.

D'après ce qui précède le « logiciel » du pilote est alors du type :

Situation inattendue (perceptions) => objectif de correction/récupération => fonction cognitive (perceptions + modèle mental) => diagnostic/décision => action => contrôle (perceptions du résultat) => correction => etc.

Celui de l'automatisme pouvant éventuellement remplacer le pilote est identique.

---

[120] Analogie reprise par Boy, G. (2013). *Orchestrating human-centered design.* Springer. London
[121] Id° 117
[122] Id° 117

Les éléments de l'équation

Dans la fonction cognitive citée deux éléments conditionnent la suite chronologique : les perceptions et les modèles mentaux. On n'en donnera ici que des généralités.

Perceptions

Elles sont le résultat du traitement neurologique des messages envoyés par les sens. Dans l'humain il ne s'agit pas simplement des données transmises par les capteurs yeux, oreilles, oreille interne, doigts, etc. Le cerveau n'exploite pas directement ces quantités brutes. Il le fait après un traitement complexe de transformations.
Par exemple dans le cas de la vision les perceptions interprètent les figurations du PFD (*Primary Flight Display*) en notion de vitesse, ou d'altitude, etc. D'où l'importance majeure d'avoir des figurations précises et significatives. Les connaissances ergonomiques sur la vision permettent d'excellentes et efficaces images de paramètres, aisées à interpréter en situation temporelle normale.
La vision humaine a des propriétés remarquables de reconnaissance de formes, d'objets, de paysages, d'images.

Dans les perceptions il ne faut pas oublier le toucher car la commande de manœuvres passe le plus fréquemment par l'usage des mains : le toucher participe à la sélection, au dosage et à la conscience du geste nécessaire, à l'aide d'une boucle spéciale d'asservissement provenant de l'expérience.

A ce sujet on peut mentionner deux contestations apportées à des solutions ergonomiques largement utilisées :
- l'absence de coordination entre les deux manches latéraux interdisant la connaissance par un pilote des mouvements exercés par l'autre pilote, connaissance permettant de suivre les ordres donnés manuellement par ce dernier. Il semble que ce problème soit aujourd'hui résolu sur certains avions utilisant les manches latéraux.
- l'absence de mouvement des manettes de poussée fixes, en mode de poussée automatique, mouvement qui permettrait de mieux suivre l'évolution automatique de la poussée. Rien de probant ne vient supporter cette critique car des incidents dus à des interférences d'automatismes sont enregistrés dans les deux systèmes, manettes fixes et manettes mobiles. Il est indéniable qu'un mouvement des manettes est ressenti par la main du pilote, cependant le problème reste sa perception mentale en situation critique nécessitant une attention dispersée, pouvant ainsi amener à « oublier » cette perception.

Cependant, les traitements complexes mentionnés ci-dessus opérés par le cerveau incluent aussi des interactions entre les différents signaux correspondant à différents sens (par exemple entre vue et oreille interne, impliqués conjointement dans l'équilibre).

Modèles mentaux

Ils sont les matériaux de base des fonctions cognitives associés à une tâche particulière (par exemple l'arrondi d'atterrissage) dont les éléments sont fixés dans les mémoires à long terme par l'assimilation de connaissances et surtout de pratiques (par l'expérience en particulier). Au passage signalons à nouveau la puissance d'ancrage mnémonique de la pratique.
Le cerveau en stocke une multitude qu'on pourrait assimiler à des algorithmes « flexibles », adaptables à la situation.
En fait, il s'agit là de la faculté d'apprentissage adaptatif, établi et corrigé par l'expérience.
Chez l'humain ce stockage est souple, pouvant s'adapter à de multiples cas différents de ceux enregistrés à l'origine, suivant le tri effectué à l'analyse d'une situation. Cette souplesse à l'enregistrement de faits, individuels ou groupés, et à leur traitement adapté à des situations de grande variabilité est une caractéristique majeure du cerveau.

Fonction cognitive

Elle est l'élément « vivant » gérant le comportement opérationnel. Elle fonctionne de façon dynamique, en fonction du temps. Dans l'humain, les perceptions orientent la fonction cognitive vers la recherche

immédiate dans les mémoires des modèles mentaux pertinents permettant à la fois de juger une situation et de la traiter. Grâce aux perceptions et, conformément à l'objectif urgent de régler le problème, elle permet au pilote de prendre conscience du problème qui surgit, qu'elle analyse et qu'elle traite immédiatement en associant aux perceptions les algorithmes que sont les modèles mentaux, dans une succession de séquences de prise en compte, de traitement et de simulations. Ce fonctionnement temporel est basé sur la mémoire à court terme qui stocke en séquences chronologiques toutes les actions conscientes, mais dont la durée de stockage est limitée à quelques dizaines de secondes au-delà de laquelle la mémorisation s'efface.

Diagnostic et choix

Ils constituent un ensemble essentiel. Ici il faut introduire un constat formulé par Jean-Claude Wanner[123] : « … une des caractéristiques majeures de l'humain qui le différencie des automatismes, (est) la possibilité de prendre des décisions reposant sur des critères qualitatifs et de la reconnaissance de formes et non sur des critères quantitatifs qui seuls permettent la programmation des automatismes.
Seul un pilote confirmé est capable de distinguer une piste à moitié cachée par le relief et de ne pas la confondre avec l'autoroute voisine. Seul un humain est capable de résoudre un problème d'ordre éthique, par exemple choisir entre un *ditching* sur le lac voisin ou le crash sur la terre ferme mais peuplée ou bien choisir entre une attente ou un atterrissage rapide avec risque de *windshear* alors qu'un passager est victime d'une crise cardiaque ! ».

Chez les humains ce problème de choix entre plusieurs solutions possibles concerne la multitude de boucles d'asservissement entre les sens et les décisions/actions, ainsi que **la multitude de calculs probabilistes immédiats d'adaptation**.
Un problème cité par les militaires dans l'exécution de leurs missions est celui du **traitement opérationnellement obligatoire des informations partiellement fausses**.
C'est là que l'automatisme humain se détache des automatismes matériels. On peut rêver que le non-déterminisme du cerveau puisse être dupliqué un jour par « quelque chose qui peut et sait tout faire », par une prothèse qui le remplace totalement au lieu de l'aider. Encore faudrait-il démontrer sa validité et sa fiabilité. En admettant que cela devienne possible ce ne sera pas avant longtemps, pas avant 2050 ou beaucoup plus loin malgré les avancées mentionnées en introduction.
Il est vrai que des progrès spectaculaires, par exemple ceux de la manipulation des génomes de l'ADN, maîtrisant sa complexité inouïe, peuvent par analogie laisser penser qu'on pourra un jour décrypter notre cerveau.

Dans cette phase de diagnostic le cerveau exécute des « calculs » basés sur la probabilité d'atteindre le but recherché par projection vers le futur, en quelque sorte en simulant l'extrapolation du présent[124].
S'il trouve des solutions dans les combinaisons *perceptions* + *modèles mentaux* utilisables et si le choix n'excède pas deux ou trois possibilités, il effectue rapidement ce calcul probabiliste et lance sa décision/action. Cette phase peut être très rapide, quelques dixièmes de seconde ou moins.
En revanche si le choix doit se porter au-delà de trois possibilités ou si aucune possibilité n'est immédiatement atteignable, le cerveau doit chercher et trouver une solution « inédite », ce qui peut prendre du temps en recherche et fabrication de nouveaux modèles mentaux à l'aide des connaissances et souvenirs d'expérience stockés dans les mémoires à long terme. Cela peut prendre de quelques secondes à quelques dizaines de secondes, avec parfois un blocage mental.

Décision-action

Elles sont pratiquement indissociables et sont immédiatement lancées vers les organes permettant leur réalisation : muscles, yeux, voix, mains, etc. Noter que le choix peut déboucher sur l'absence d'action… !
Le contrôle du résultat suit le même processus.

---

[123] JC Wanner, Ingénieur général de l'armement, membre de l'AAE

[124] Koechlin, E & Collins, A. (2012). Reasoning, Learning, and Creativity: Frontal Lobe Function and Human Decision-Making. Journal.pbio. 1001293

L'action et son contrôle nécessitent une boucle fermée d'asservissement.

Quelques remarques sur ce processus

- Des expériences se poursuivent, notamment à la Technische Universität München, de commande directe de trajectoire par la captation externe de signaux du cerveau (projet *Brainflight*, commande de trajectoire horizontale d'approche). Avec un résultat positif limité il y a encore énormément à faire pour en tirer un procédé fiable, mais cela mérite d'être mentionné.
- La méthode non invasive de détection des fonctionnements neurologiques, la NIRS (*Near-InFrared Spectrology*) offre d'intéressantes perspectives.
- La fiabilité de la commande par le toucher d'écrans tactiles est à prouver dans les situations difficiles, par ex. en forte turbulence, en actions multiples rapides ou avec stress. Associée à cette source d'erreurs se situe la nécessaire possibilité de récupération rapide et sure de ces erreurs.
- De même pour la reconnaissance vocale, alors qu'on se débat aujourd'hui avec la fréquente incompréhension dans les communications automatiques vocales téléphoniques. Il sera difficile d'aller au-delà de quelques locutions simples du type alphabet OACI. L'influence des altérations de voix dues à des facteurs personnels (rhumes, stress) ou extérieurs (accélérations) est trop importante. Les militaires n'utilisent ce moyen que pour des actions n'impliquant pas la sécurité opérationnelle, excluant par exemple le contrôle de la trajectoire et des systèmes d'armes.
- Dans les enregistrements vidéo de phases de vol il est commun d'observer des échanges gestuels muets entre pilotes lorsque la charge de travail est importante et que l'usage de la voix imposerait une charge mentale supplémentaire. Ce fait semble avoir été négligé alors qu'il est banal et efficace.

Caractéristiques du comportement face à une situation imprévue

Ces caractéristiques sont les suivantes[125], intéressantes à comparer aux possibles performances d'automatismes remplaçant l'humain :

- L'évènement surgissant est perçu rapidement, sans être forcément analysé.
- Cependant les capacités cognitives conscientes sont instantanément mobilisées à leur maximum de possibilité.
- Un diagnostic immédiat est initié nécessitant l'analyse des perceptions disponibles. Mais sans forcément accéder immédiatement à la situation réelle ou sans une vue globale de cette dernière, il peut mener à des focalisations néfastes ou à des erreurs d'interprétation.
- Fréquemment le diagnostic est basé sur la mémorisation de situations antérieures, sur l'intuition. Mais la vérité peut être autre et l'intuition ne marche pas à tous les coups, même pour des experts que sont les pilotes.
- L'importance du diagnostic ne réside pas en la connaissance de la cause mais en celle de la situation exacte réelle d'où l'importance de la fiabilité des perceptions fonctions de l'interfaçage, paramètres avion / capacités pilote.
- Les réactions doivent être rapides, et correctes pour éviter l'amplification des dérives.
- Ainsi que déjà vu une focalisation de l'attention retarde et même inhibe la possibilité d'une prise de conscience de situation réelle lorsqu'elle utilise la totalité de la capacité consciente sur la mémoire court terme.
    - La sortie de focalisation nécessite un « choc mental » ; une alarme n'est pas forcément suffisante. Par exemple une alarme hors contexte est inopérante, voire néfaste.
- Une récupération de situation dangereuse à évolution rapide nécessite des actions simples pour être compatibles avec l'association temporelle temps disponible <=> durée de la mémoire court terme.
    - La récupération consciente nécessite d'autant plus de temps que le type d'évènement est éloigné de la situation antérieure (recherche mnémonique de modèles mentaux

[125] Id° 117

adéquats) et que le pilote n'est pas formé, éduqué, de façon générale aux situations inattendues.

- Par exemple la capacité de résolution par l'Humain des situations rapides, dynamiques et dangereuses issues de la mécanique du vol n'est pas adaptable à toutes les situations lorsqu'on lui demande, par l'exploitation complexe simultanée de plusieurs paramètres, de résoudre les problèmes immédiats inhérents à la situation présente.
- Il y a coexistence de deux phénomènes cognitifs : une rupture par l'évènement déclencheur du fonctionnement cognitif antérieur et une focalisation de l'attention, normale si elle ne se concentre pas exclusivement sur un paramètre.

Traitement probabiliste des données

Nous avons vu la difficulté d'un choix au-delà de 2 à 3 sélections possibles. En fait le cerveau traite les informations reçues de façon probabiliste, par inférence probabiliste, pratiquement en appliquant la méthode de déduction « bayésienne »[126]. Cette aptitude lui permet, en utilisant son expérience et ses connaissances accumulées depuis son enfance, de sélectionner rapidement les données à traiter qu'il estime les plus probables. Ce processus est élémentaire, très rapide et généralisé, d'où l'aptitude humaine aux choix et décisions en situation « non déterministes ». Il fonctionne en permanence pour toutes données, avec la mise en place d'un apprentissage basé sur un stockage d'inférences.
Cependant il se heurte aux limitations d'ordre supérieur rencontrées dans des situations opérationnelles complexes mentionnées dans les chapitres précédents, d'où le problème de nombre limité de choix en situations d'évolution rapide.

La vigilance – L'éveil

Ce sujet a des répercussions importantes dans l'évolution actuelle de la longueur des étapes. Jean-Claude Bück le traite de façon détaillée dans un document interne à l'AAE[127] dont nous ne mentionnerons ici qu'un extrait. Il s'agit là de limitations humaines opérationnelles affectant l'interfaçage avec les automatismes/prothèses.

« Pour rester vigilant, il faut être en bonne condition physique et mentale, il faut être motivé et on a besoin d'information.
Condition physique et mentale :
Si on est fatigué, épuisé, si on est sous l'influence de l'alcool, d'une drogue ou d'un médicament inapproprié, si on a fait un repas trop copieux, il est difficile d'être vigilant.
Motivation :
Si vous êtes très intéressé par ce que vous faites : chasse, pêche, pratique d'un sport, si vous regardez un film d'action, si vous lisez un roman policier haletant, il est facile d'être vigilant.
Information :
Pour être vigilant, il faut de l'information. L'homme ne peut rester vigilant sans information. Vous pouvez regarder un feu de bois dans la cheminée pendant des heures. Les flammes en mouvement perpétuel sont de l'information. Vous n'êtes pas capables de concentrer votre regard sur un foyer vide. Prenons un meilleur exemple. Vous êtes dans votre voiture, arrêté à un feu rouge. Vous n'êtes pas capable de fixer cette lumière rouge. Vous regardez autour de vous, vous parlez à vos passagers, peut-être regardez-vous la jolie fille dans la voiture à coté de vous et, quand le feu passe au vert, vous ne le remarquez pas jusqu'à ce que la voiture derrière vous commence à klaxonner. Parce qu'il n'y a pas d'information dans un feu rouge fixe. »

La perte de vigilance et la tendance au sommeil au cours de périodes de calme opérationnel pourraient inciter à abandonner ici l'aspect d'automatisme intelligent opérationnel humain. Il est probable qu'on n'ait pas encore correctement traité ce cas d'après ses caractéristiques neuropsychologiques exactes.

[126] Dehaene, S. (2014). *Le cerveau statisticien.* In C3RV34U, La Martinière. Paris
[127] Reproduit en annexe

La **reprise de conscience** mérite quelques remarques
Le cerveau est en fonctionnement permanent même dans son apparent repos mental[128]. Il est donc disponible instantanément sur sollicitation, externe ou interne. Cependant dans une situation normale d'éveil, ou dans les cas cités précédemment de réveil brusque, son fonctionnement conscient sur une situation surgissant au milieu d'un travail mental n'ayant rien à voir avec ladite situation, nécessite un « recalage » intellectuel ayant des caractéristiques particulières et prenant un délai de compréhension de situation pas forcément compatible avec le temps disponible.

En résumé la vigilance est directement fonction de l'activité. Le problème est donc le maintien d'activité mentale liée à la mission, le monitoring n'étant pas en soi une activité associée directement à un résultat.

Limitations humaines dynamiques

Les deux caractéristiques *d'apports séquentiels conscients* et de *saturation de mémoire court terme* sont des **limitations mentales majeures** que tous les bureaux d'études doivent connaître et appliquer. Elles sont dynamiques ce qui implique que le ***temps*** est le **paramètre-clé** de toute action mentale, surtout pour l'utilisation du **temps disponible** à la récupération d'une situation dangereuse à évolution rapide.

Une conséquence importante pour la sécurité est que si un problème est difficile à résoudre avec une charge mentale élevée (par exemple sous stress) il peut y avoir une **focalisation parasite de l'attention** sur une perception donnée, saturant la mémoire à court terme du fait de l'empilement séquentiel des actions conscientes, ce qui interdit d'autres actions conscientes de s'exercer (phénomène dangereux d'**effet tunnel**).

En revanche les actions non-conscientes ne s'impriment par sur la mémoire à court terme, donc ne participent pas à sa saturation mais peuvent être alors divergentes ou disparaître.

Fiabilité et apports humains

Dans la compétition Humain/automatismes la fiabilité de chacun des deux super-agents est à regarder de près. Pour le premier nous allons voir quelques aspects de la situation actuelle, positifs et autres.

Fiabilité opérationnelle - Apport de l'Humain à bord

Nous avons analysé la fiabilité opérationnelle individuelle en détail au chapitre précédent. Cependant avant de la juger en fonction de l'éventuel remplacement de l'Humain par « autre chose » il faut y **rajouter un élément largement positif** à ne pas oublier ou négliger.

Les rapports d'accidents et d'incidents graves montrent que parmi leurs causes l'intervention humaine dans le cockpit y participe de façon négative dans environ la moitié des cas[129]. De là l'idée de se débarrasser de cet Humain peu fiable et de plus financièrement cher. Or, bien que cette idée date déjà de plus de 30 ans, depuis l'avènement des automatismes de conduite du vol, tous les avions de transport présentés aujourd'hui à la vente continuent d'être conduits par un équipage à deux pilotes. D'où vient ce paradoxe ? L'explication vient de la rareté des accidents, et de facteurs masqués par la banalité des actions quotidiennes.

Les pilotes ne sont pas uniquement des fauteurs d'accidents mais **ils interviennent de façon permanente et positive sur des situations imprévues ou inattendues mais banales** au cours de toute mission de transport aérien. L'occurrence parmi ces interventions de celles positives ayant arrêté une divergence dangereuse est très largement supérieure à celle des incidences négatives. Malheureusement ce sujet n'a jamais été objectivement quantifié. Avant de supprimer l'équilibre actuel de 2 pilotes,

[128] Raichle, M. (2014). *Pas de repos pour le cerveau*, In C3RV34U, La Martinière. Paris
[129] Livret 1, ch. 4

certainement à améliorer**, il est indispensable de quantifier ce point**. La communauté aéronautique possède des données encore inexploitées de ce point de vue. Par exemple l'exploitation des LOSA (*Line Operation Safety Audit*), dont l'objet actuel est la chasse dans le comportement des pilotes aux déficiences opérationnelles éventuelles pour les corriger, c'est-à-dire ne s'intéressant qu'aux aspects négatifs, pourrait probablement aider dans la quantification de ces apports positifs volontairement ignorés, au-delà des seuls constats négatifs.

Fiabilité physiologique

Une raison majeure de l'équipage à deux pilotes tient à la fiabilité physiologique humaine limitée. L'étude du Livret 5 de Jean Broquet, basée sur des données fiables, montre de ce point de vue que l'absence d'un deuxième pilote à proximité immédiate augmenterait les risques. La perte totale de capacité d'un pilote unique est autour de $0{,}5x10^{-6}$/heure de vol. Une perte partielle de capacité, permettant éventuellement d'attendre une assistance possible, est aussi de $0{,}5x10^{-6}$/heure de vol.
Le problème est double : la reconnaissance rapide de la perte de capacité et la mise en œuvre rapide de l'assistance nécessaire. La possibilité d'avoir une détection des signes avant-coureurs de défaillance permettrait une mise en place anticipée de moyens de récupération à définir. Rien de fiable n'existe aujourd'hui.
Dans le cas du pilote unique à bord cette limitation de fiabilité impose à elle seule une assistance adéquate, soit venant du bord soit venant du sol.

Fiabilité de l'équipage à deux

L'actuel équipage à deux offre de façon positive plusieurs types d'assistance mutuelle :

- prise en compte en cas d'indisponibilité physiologique ;
- monitoring réciproque des situations et des actions, corrections d'erreurs et d'oublis ;
- aide au diagnostic de situations complexes ;
- partage de tâches d'urgence ; aide du PNF au PF lorsque ce dernier est totalement pris par la récupération immédiate d'une situation délicate sinon dangereuse, par exemple la gestion de la trajectoire, en traitant les actions d'aide nécessaires, par exemple la gestion des systèmes (cas du vol US Airways 1549, 2009) ;
- partage de tâches normales, ce qui en revanche peut être préjudiciable à la bonne exécution d'un monitoring indispensable dans des situations à évolution rapide ;
- interventions en cas de baisse de vigilance, d'absence momentanée du cockpit, de gestion du sommeil ;
- éventuellement intervention en cas d'action dangereuse d'un pilote.

En revanche les pilotes, qu'ils soient commandant de bord (CDB) ou copilote, sont sujets à des déficiences opérationnelles. L'étude du Livret 5 fournit quelques chiffres provenant d'audits du genre LOSA. Par exemple :

- non suivi volontaire ou non de procédures ou de règles,
- erreurs dans les communications avec l'ATC,
- déficiences opérationnelles (connaissances, habiletés, procédures),
- erreurs dans des choix et dans des actions,
- mauvaises interprétation d'informations extérieures (météo, état des pistes, etc.),
- problèmes au sol (terminal, roulement, passagers, etc.)

Le rapport traité, concernant plus de 300 vols sur deux types d'avions modernes (Airbus et Boeing), montre :

- un taux moyen d'erreurs légèrement inférieur à 1,6 par vol dont 60% du fait du CDB,
- un taux de correction d'erreurs légèrement inférieur à 40%, avec pour les erreurs non corrigées une moitié environ sans conséquence,
- une détection des erreurs « de l'autre » supérieure à la détection des siennes, 40% contre 7%,

- un taux de survenue d'une « menace » extérieure au cockpit, d'un danger potentiel (tel que météo, pannes, trafic, obstacles, etc.), de 1,4 par vol, sans qu'on ait le degré de sa dangerosité,
- un taux de correction légèrement inférieur à 60% pour ces menaces.

Cependant malgré toutes ces déficiences **aucun incident n'a été enregistré** au cours de ces vols ce qui montre la relativité des problèmes. On ne peut donc en tirer que trois hypothèses approximatives :

- les pilotes ont des déficiences opérationnelles, avec des taux d'environ 1,6/vol pour l'ensemble des deux pilotes, et 1/vol pour le seul CDB dont environ la moitié est corrigée ;
- le taux de détection (donc de correction) de l'ensemble des « menaces », des dangers potentiels, est d'environ 60% par l'ensemble des deux pilotes, sans qu'il soit possible d'estimer ce que serait ce taux avec un seul pilote ni quel était le niveau de dangerosité présenté par ces menaces ;
- l'absence d'incident permet de penser que s'il y a eu des dangers potentiels sérieux ils appartenaient au lot des 60% ayant été corrigés, avec en corollaire une tolérance globale élevée à l'absence de correction des « menaces courantes ».

Il est intéressant de noter que les mêmes menaces ont été traitées à 83% en simulateur de vol contre 60% en vol, ce qui amène à une certaine prudence dans une transposition éventuelle de résultats en simulation vers les vols réels, donc aussi **une grande prudence dans l'utilisation de la seule simulation pour l'acquisition d'une expérience de vol**.

Ces résultats même approximatifs montrent que l'équipage à deux n'a pas atteint un niveau optimal de fiabilité, mais le faible taux global d'accidents est loin de démontrer qu'il soit nuisible à la sécurité.
Le pilote unique ferait-il plus attention aux menaces, alors que l'autonomie lui apportera plus de confort dans l'exécution de ses tâches ? Il est possible que l'absence de l'obligation d'agir à deux et la suppression de l'assistance de monitoring direct amène chez le mono-pilote une plus grande attention sur ces tâches. Les militaires ont ce genre d'expérience. Cela contrebalancera-t-il la baisse de vigilance accompagnant le confort de l'autonomie ?

Un fait nouveau intervient ici. En 2015 il n'y a eu aucun accident mortel d'avion de transport hors turbopropulseurs. Osera-t-on dire que la technologie est l'élément-clé de ce succès **et que l'équipage à deux n'y est pour rien** ?

Fiabilité psychologique

Ce genre de fiabilité revêt plusieurs aspects.

- Coopération interne à bord en équipage à deux.
  Sans éliminer totalement les frictions possibles l'imposition du CRM a certainement amélioré considérablement la collaboration entre pilotes malgré les déficiences opérationnelles mentionnées aux chapitres précédents.

- Protection contre les actes personnels dangereux, en dehors des cas déjà traités d'atteinte des limitations cognitives.
  Il est très difficile, sinon impossible, d'arrêter les gestes suicidaires d'un pilote psychologiquement malade déterminé à planter l'avion. Les cas enregistrés de suicide le démontrent. Cependant, et bien que ne connaissant aucun cas répertorié pouvant le montrer, il est hautement probable que la présence d'une autre personne à côté de soi puisse être souvent un frein à la mise en pratique d'un geste désespéré intentionnel. L'obligation de remplacer un pilote devant s'absenter du cockpit par une tierce personne est probablement correct psychologiquement, même si son aide pourrait être physiquement problématique.
  Il est probable que l'exploitation des milliers de rapports d'incidents pourrait donner des informations sur le sujet.

- Cas du vol 4U 9525.
  Ce cas singulier, comme désormais aujourd'hui la plupart des accidents aériens, pose en supplément le problème de la mise en cause de la protection contre le terrorisme devenant un

obstacle à la défense contre un suicide. Ici le blocage de la porte du cockpit. Il démontre de façon irréfutable les limitations imposées aux humains par l'infinie complexité des cas à envisager pour une totale prise en compte opérationnelle par des automatismes, alors que nous sommes incapables de tous les imaginer. N'aurait-il pas été préférable de laisser aux pilotes une part de libre-arbitre dans l'utilisation de solutions de protection irréversibles ? On voit mal comment une solution d'intelligence artificielle forte aurait pu fonctionner dans cet accident.
On peut s'attendre à une conséquence indirecte de cet accident. L'imposition d'une tierce personne non pilote dans le cockpit va probablement relancer l'idée de l'aide éventuelle venant du personnel de cabine dans le cas du SPO (*Single Pilot Operation*).

- Le cas du pilote unique, traité plus loin, est à considérer avec soin. En fait il s'agit à la base d'un problème difficile et assez mal résolu de la connaissance de l'aptitude psychologique à exercer le métier de pilote, à la sélection, pendant la formation et durant la carrière. Autant les paramètres physiologiques sont aisés à contrôler parce qu'ils sont mesurables, autant un test ou un entretien d'estimation psychologique non mesurable peut être sujet à caution en l'absence d'élément caractérisé. Aujourd'hui le suivi psychologique de l'ensemble des pilotes d'une compagnie n'est pas organisé de façon à détecter rapidement une évolution catastrophique, et le bien-fondé d'une révocation de pilote pour des raisons de risque psychologique est le plus souvent difficile à établir.
  La recommandation de tester la maîtrise de soi et l'appréciation des risques au recrutement va dans le bon sens d'une estimation de la « solidité mentale » des pilotes. Cette sélection s'impose dans le SPO.

- Il faut noter que la question de la fiabilité psychologique semble correctement traitée par les militaires du fait de l'obligation vitale propre à la nature de leurs missions et grâce au suivi serré de leur personnel.

- Dans la revue des aspects psychologiques il nous semble important de mentionner un élément majeur concernant cet automatisme de haut niveau d'intelligence qu'est le pilote et qu'aucun automatisme de quelque niveau qu'il soit n'arrivera à remplacer : **le libre arbitre** dans la motivation et l'éthique personnelle.

Un tel sujet oblige à s'exprimer directement :
Nous, pilotes, dans notre majorité, aimons traiter les cas plutôt difficiles, que nous surmontons et où, pas forcément sans problème, notre habileté mentale et physique (est-ce une virtuosité ?) est mise à l'épreuve. C'est ce que nous aimons. Cette caractéristique de la profession est systématiquement occultée, probablement parce que nous pourrions passer pour des irresponsables dangereux, ce qui est malheureusement parfois le cas (A320 d'Habsheim, 2009). Cependant elle nous aide puissamment à bien réagir dans des situations difficiles, tout en étant aussi un obstacle à l'abandon des pratiques actuelles de pilotage, acquises il faut le dire au cours d'un entrainement long et difficile. Leur remplacement par d'autres pratiques serait une épreuve.
Nous avons tous les mêmes limitations déjà citées, bien qu'elles dépendent aussi de caractéristiques individuelles et environnementales, fatigue par exemple. Normalement chacun de nous devrait être capable de déceler l'approche de ses limites et de prendre soin de sa santé physique et mentale, ce que mentionne le code de l'Aviation civile : *" Un pilote ne doit pas prendre son service dans un aéronef ...s'il sait ou s'il pense que son état de fatigue peut mettre en danger la conduite du vol"*.
Mais là notre population de centaines de milliers de pilotes comporte un pourcentage non négligeable d'individus n'ayant pas ce souci permanent de la tâche bien exécutée, et se laissant aller à des comportements à risque lorsqu'un intérêt personnel est en jeu (retour à la base, accompagnement de personnes connues, conséquences financières…). Les règlements stricts sont là pour placer des garde-fous, pouvant cependant être aisément franchis en l'absence d'éthique personnelle.

Nous revenons ici au problème de la sélection initiale, de l'éducation technique et mentale, et du suivi de l'équilibre mental et physiologique en opération. Il n'est résolu que superficiellement malgré quelques efforts. Alors le choix de l'élimination des pilotes au profit de matériels sans état d'âme s'imposerait-il ? Il vaut mieux évaluer les risques avant de prendre une telle décision, en n'oubliant pas qu'aujourd'hui **l'amélioration du taux d'accidents concerne des aéronefs à équipage de deux pilotes.**

Résilience humaine

Suivant la technique éprouvée de l'ingénieur nous avons sectorisé, découpé, cette fiabilité humaine, en sacrifiant à la tendance de se concentrer sur ce qui ne marche pas toujours bien. Mais il y a de nombreuses interactions et interférences entre ces fiabilités soumises à des facteurs communs permanents et occasionnels, dont on mentionne ici pêle-mêle quelques-uns : attention, fatigue, temps de réponse, expérience, émotions, stress, éthique, addictions, conscience professionnelle, etc. mains ». En oubliant la formidable résilience humaine constamment à l'œuvre dans chaque mission, dans chaque vol, corrigeant de façon permanente la multitude de défauts opérationnels que les humains ne peuvent pas, et ne pourront jamais, prendre en compte dans leur totalité.
Il est vrai que dans la majorité des accidents la part humaine impliquée est qualifiée de « défaillance humaine », en fait surtout là où la résilience a fait défaut. A l'analyse, ainsi que déjà vu, il s'agit le plus souvent de « déficience humaine », de dépassement des limites mentales humaines dans une situation difficile. Ceci est la raison pour laquelle nous utilisons le terme de « déficience ». Mais ces cas de déficience sont beaucoup moins nombreux que ceux où la résilience se manifeste.

Redondance dissemblable

Cette notion est appliquée aux systèmes de l'avion partout où leur duplication est nécessaire afin d'assurer un niveau de sécurité suffisant, par exemple dans les calculateurs de commandes de vol où leurs logiciels sont différents malgré des spécifications techniques identiques.
Cette notion renforce la nécessité déjà exprimée d'un interfaçage adapté à la communication correcte et fiable au sein du duo de ces deux « agents » que sont les pilotes.
L'équipage à deux pilotes est une illustration de la redondance dissemblable appliquée à l'humain dans le cockpit.

Elle s'applique au duo Pilote/automatismes, le pilote étant un automatisme de haut niveau, redondant vis-à-vis de l'ensemble des systèmes constituant la partie autonome de l'avion, justifiant en quelque sorte sa présence à bord.

3ème partie : ETAT ACTUEL de la COOPERATION

Evolution des participations croisées et connectées Humain/automatismes

Bases de l'évolution

Cette partie n'a pas pour objet d'en faire l'historique, très bien traité dans le Livret 2 par Pierre Calvet, mais de montrer les mécanismes d'une évolution pour essayer de deviner sa projection future.
Même s'il y a eu des variations rapides dans cette évolution, les changements n'ont pas été brutaux et, en faisant l'hypothèse qu'il en sera de même d'ici 2050, le futur devrait suivre l'évolution de la tendance actuelle malgré l'avancée accélérée des connaissances sur le fonctionnement cérébral et sur l'intelligence dite artificielle. La mondialisation, le volume de l'ensemble des matériels aériens, les coûts et le souci de sécurité imposent à l'évolution une importante inertie aux changements et innovations rapides.

L'évolution des automatismes a déjà été mondialement traitée pour la période allant jusqu'à cette révolution que représentent depuis quelques années l'avènement des drones et la reprise du concept d'intelligence artificielle.

En quelques mots les objectifs étaient et sont encore:

- rendre physiquement possible les actions humaines physiologiquement impossibles : ex. servocommandes, vision augmentée ;
- remplacer les pilotes dans des tâches répétitives ;
- améliorer la performance et la précision de la conduite du vol par la prise en compte des lois de la physique régissant la dynamique du vol et les calculs mentalement longs et complexes: ex. pilotage manuel instantané (*fly-by-wire*) et automatique des trajectoires, navigation automatique, FMS, atterrissage sans visibilité ;
- prendre en compte la gestion des systèmes de l'avion, là aussi par l'application des lois de la physique : ex. systèmes carburant, électricité, hydraulique, conditionnement d'air ;
- améliorer l'interfaçage avec les pilotes (au travers de leurs sens, surtout vision et audition mais aussi toucher) et assurer le maintien de la conscience des situations: présentation ergonomique (physiologique et mentale) des paramètres et des modes de fonctionnement des aides au pilotage, ex. PFD, MD, FMA, VD, ECAM, HUD, commandes et leviers, minimanche;
- respecter les limitations physiques des domaines de fonctionnement en imposant des frontières repérables, frangibles ou non : ex. alarmes et limitations de fonctionnement aux frontières du domaine de vol, ou en limites de capacité des systèmes ;
- éviter les obstacles et zones dangereuses par leur détection et la gestion des actions d'évitement, manuelle ou automatique : ex. TCAS, EGPWS, radars météo.
- et aussi éviter les intrusions humaines dangereuses : ex. protection du cockpit.

Même si c'est évident il faut préciser une constante dans cette évolution globale, parfois oubliée derrière la grande diversité des analyses chronologiques : l'humain est resté au centre d'une évolution lui ayant apporté l'aide nécessaire au fur et à mesure des circonstances et des possibilités, alors qu'il était et qu'il est toujours victime de ses déficiences, disons de ses limitations humaines physiques et mentales l'empêchant de progresser. On lui a donc procuré les **prothèses physiques et mentales** nécessaires pour atteindre ses objectifs, essentiellement de performance et de sécurité.

Cependant il faut aussi remarquer qu'on n'a pas hésité à éliminer l'Humain quand il semblait devenir inutile, quand les automatismes pouvaient le remplacer en améliorant les performances sans nuire à la sécurité. Mais aussi parce qu'on en retirait un avantage sociétal, commercial et financier par l'augmentation des performances et de la sécurité associée à la diminution des coûts. Ainsi les navigateurs puis les mécaniciens ont successivement disparu des cockpits.
Aujourd'hui seuls les pilotes sont encore considérés indispensables. La question est donc jusqu'à quand ?

Points encore insuffisamment traités

Certains sont connus de longue date, d'autres apparaissent à l'usage. Voici quelques exemples non limitatifs.

D'abord les communications entre humains :

- dans le cockpit : la coordination et la coopération humaines entre les deux pilotes a certes été améliorée par l'usage du CRM (*Crew Resource Management*) mais la fonction de « *monitoring* », une nécessité dans la prévention des accidents, laisse toujours à désirer ;
- avec l'ATM : il s'agit de deux problèmes concomitants, celui difficile des communications par radio tout autour de la Terre et celui de l'insertion dans un trafic aérien sectorisé dont le contrôle reste encore essentiellement humain et vocal. Depuis des décennies on essaie de les résoudre. On peut constater qu'en matière de communication sol-bord le client, le passager, semble

bénéficier de certains avantages plus rapidement que le pilote (téléphonie et wi-fi) avec cependant une exigence de fiabilité notablement moindre.

Ensuite le traitement d'aléas opérationnels soudains, inattendus voire imprévisibles. Les phénomènes météo en font partie mais ne sont pas les seuls ainsi que les milliers de compte-rendu d'incidents en témoignent. Ces aléas sont de mieux en mieux pris en compte mais leur nature et leur occurrence restent illimitées. **Cette source de problèmes souvent vitaux restera donc permanente.**

Enfin il y a la difficile défense contre les actes de folie humaine, terroriste ou individuelle.

Quelques étapes

Plusieurs grandes phases peuvent être observées dans l'évolution du transport aérien, où celle des automatismes ne représente qu'une part indissociable de l'ensemble.

- Dès le début et de façon permanente et durable la technologie a été le socle majeur des innovations, et les éléments du pilotage automatique sont progressivement apparus.
- A partir de la Seconde guerre mondiale l'usage des procédures opérationnelles s'est généralisé.
- Dans les années 1950 la propulsion à réaction, par l'augmentation des masses, de la vitesse et la diminution des temps dévolus à la conduite des phases de vol, oblige à recourir aux automatismes.
- Dans les années 1960 apparaît la possibilité d'atterrissages entièrement automatiques (Caravelle).
- Dans les années 1970 les automatismes de conduite se sont généralisées et standardisées (B747, L1011, DC10, A300, Concorde…) ; la navigation par inertie est devenue un standard. Les analyses de tâches pour les procédures, les documents opérationnels, la formation avec l'application du « *need to know* » deviennent la norme. La simulation est devenue un outil irremplaçable pour les études des systèmes et l'intégration opérationnelle de l'Humain. Elle devient l'obligatoire élément de la formation pour la fixation mnémonique par la pratique.
- A cette époque Concorde a joué un rôle majeur dans les commandes de vol électriques, les systèmes automatisés, la commande électrique des moteurs, la connaissance du supersonique et du transsonique, les premiers calculateurs numériques (entrées d'air), le contrôle du centre de gravité par transfert de carburant, **la mise en place de méthodes et de standards d'analyse probabiliste de fiabilité et de sécurité intégrés dans les processus de certification**[130].
- Dans les années 1980 les calculateurs numériques ont révolutionné les systèmes. Apparition des « Glass cockpits » et d'une standardisation des présentations des commandes et contrôles. Suppression du mécanicien navigant et automatisation des systèmes de l'avion.
- A la même époque, débuts laborieux de la prise en compte du comportement humain. Utilisation du CRM (*Crew Resource Management*) au sein de l'équipage. Introduction du comportement dans les analyses de tâches. Apparition de problèmes d'interfaçage entre pilotes et automatismes.
- Dans les années 1990 intégration du facteur « comportement » dans les travaux des bureaux d'études en particulier dans l'étude des automatismes. Recours systématique à la simulation et à la psychologie. Colonisation des cockpits par l'usage du numérique bureautique pour les commandes de systèmes, de sélection et de présentation.
- Pendant 20 ans on assiste au raffinement des automatismes, à l'utilisation des satellites pour la navigation et les communications, et à l'établissement de standards de certification des facteurs humains.
- Aujourd'hui la robotique, les drones, entrainent l'obligation d'une nouvelle réflexion[131], alimentée aussi par l'amélioration de la connaissance des mécanismes cérébraux humains.

[130] le Livret 5 en est une parfaite illustration

[131] voir Livret 6

Avancées et résultats constatés dans l'intégration des automatismes

Prises dans leur ensemble ces évolutions ont amené une amélioration considérable de la sécurité avec la participation active conjointe de quelques paramètres-clés, par exemple :

- Fiabilité accrue des équipements de technologie numérique,
- Utilisation des retours d'expérience,
- Utilisation de procédures opérationnelles optimisées,
- Méthodes et procédures élaborées de mise-en-œuvre et de maintenance,
- Méthodes de formation appropriées pour les personnels navigants et de maintenance,
- Vigilance des autorités de certification,
- Prise de conscience par les hauts responsables du transport aérien et de l'industrie de l'importance des bénéfices apportés par la sécurité, et à l'inverse des dégâts juridiques, financiers et commerciaux provoqués par sa diminution.

Cette avancée considérable de la sécurité va curieusement de pair avec celle de la performance du système de transport aérien. Même lorsque la recherche prioritaire de la performance est essentiellement financière et commerciale plutôt que technique on constate que la sécurité en bénéficie.

Quelques résultats et faits notables :

- Réduction drastique du taux d'accidents, avec un palier de faible amplitude ($0{,}1.\ 10^{-6}$/ heure de vol en Amérique du Nord et en Europe), apparemment accepté tacitement par la communauté du transport aérien sauf dans les parties du monde où le taux y est encore largement supérieur. Mais ces accidents de faible occurrence, toujours dramatiques, sont par contraste difficilement acceptés par le public. Et leurs causes en partie aléatoires ne peuvent plus faire l'objet d'analyses exclusivement statistiques.
- Les évènements accidentogènes sont pour la plupart soudains et inattendus, parfois imprévisibles. Les limitations cognitives humaines sont le plus souvent en cause. La nécessaire prise de conscience des situations à risque est sujette à la présentation des paramètres l'autorisant, malheureusement encore loin d'être correcte en situation de stress. En fait il s'agit là de l'interfaçage entre l'Humain et la situation à laquelle il est confronté. On est encore loin du principe d'étude de l'ensemble indissociable **agent humain + agent systèmes** évoqué au début.
- La gestion de la composante verticale de la trajectoire est fréquemment la cause de difficultés pour les pilotes du fait de la nécessité de mener de pair les variations de vitesse, de nombre de Mach, d'altitude, de vitesse verticale, d'assiette, d'incidence et de poussée. Les automatismes prennent en compte cette gestion mais les pannes, les variations de modes, les reprises en main s'avèrent parfois difficiles à gérer et causent des problèmes d'interprétation de situations. La gestion horizontale cause moins de soucis.
- Les procédures et les check-lists procurent une grande sécurité dans le traitement de situations où leur temps d'exécution est compatible avec la résolution d'un problème difficile. Leur présentation sur les écrans du panneau pilote est une avancée ergonomique, surtout lorsqu'elles comptabilisent les actions correctrices effectuées. Cependant elles s'avèrent difficilement applicables lorsque le temps disponible est incompatible, lorsque le stress s'installe dans le cockpit, ou simplement lorsque des fumées envahissent le cockpit.
- Les automatismes procurent un confort opérationnel lorsque la mission est exécutée en conformité avec les prévisions. En revanche on peut observer des phénomènes traduisant un effet potentiel adverse, ou l'absence d'effet positif :
    - un abaissement de la vigilance dans les périodes de « calme » telle que la croisière, n'exigeant aucune action sinon surveiller un fonctionnement monotone,

    - la permanence d'une occupation mentale élevée dans le cockpit dans les phases toujours délicates près du sol, au décollage et à l'atterrissage (qu'on soit dans une Caravelle, un A300B ou dans un A380, avec ou sans automatismes),
    - la difficulté de reprise en main lors d'une perte des automatismes, ou à comprendre leur fonctionnement dans une situation complexe, par ex. givrage de sondes, ou utilisation du FD (*Flight Director*) en remise de gaz (RDG) non standard,
    - avec en corollaire l'oubli ou, malgré l'exigence formelle des procédures, une moindre priorité accordée à la consultation des modes de fonctionnement des automatismes (FMA, *Flight Management Annunciator*) lorsque des actions immédiates sont requises, par ex. en RDG.
- Prise en compte récente par la FAA et l'EASA des lacunes de la formation des pilotes improprement focalisée sur l'utilisation prioritaire des automatismes, au détriment des connaissances et habiletés de base, et du renfort de la résilience aux situations difficiles et complexes. Un minimum de pratique des trajectoires de décollage et d'approche en pilotage manuel est désormais requis[132].
- Constat que la formation des pilotes militaires est souvent meilleure que celle des civils.
- Constat que l'agencement des cockpits de l'aviation d'affaire bénéficie parfois d'innovations en avance sur l'aviation commerciale.
- Constat de l'accélération de l'avancement des connaissances sur le fonctionnement cérébral.

Mais aussi une question de fond :

Si le taux d'accidents a décru de façon importante dans les dernières décennies en revanche, **à l'intérieur de ce taux**, la proportion des déficiences humaines dans les causes de ces accidents est restée relativement forte bien qu'ayant baissé de 75% à 50% en 40 ans. On aurait pu penser :
- soit que cette proportion aurait augmenté, l'humain ne changeant pas alors que les matériels devenaient plus fiables,
- soit qu'en donnant aux pilotes un environnement plus ergonomique cette proportion aurait diminué plus rapidement.

D'où vient cette quasi-constance ? Que traduit-elle ?
L'hypothèse la plus satisfaisante semble être : quel que soit son environnement opérationnel, les limitations humaines de fonctionnement d'un pilote, de son comportement, sont un invariant. Elle est confortée par le rôle des facteurs humains dans les analyses des causes d'accidents[133].

Analyse de la situation actuelle et des tendances

Faits et croyances

Les précédents chapitres montrent que l'évolution des automatismes est le fruit de multiples compromis successifs tirant bénéfice de l'évolution de la science, de la technique, de la technologie, des exigences liées à l'essor du trafic aérien, et surtout de l'innovation permanente.

Alors qu'on pensait que les pilotes accueilleraient favorablement la prise en compte automatique de fonctions difficiles à traiter et s'en accommoderaient aisément il fallut déchanter dans les années 1980 en observant leur réaction initialement négative, leur méfiance vis-à-vis de ces systèmes. De nombreux rapports en témoignent[134].
L'explication était simple : auparavant les automatismes prenaient en compte des fonctions simples, des segments de fonction, laissant au pilote la capacité du suivi de leur évolution temporelle, par exemple la conduite du vol d'une balise A à une balise B, ou le transfert de carburant d'un réservoir vers un moteur. Soudainement on traite automatiquement un ensemble de segments sans s'arrêter à leurs limites unitaires, par exemple le vol du départ à sa destination avec le FMS, ou l'agencement automatique du

[132] FAA : RIN-2010-AJ200, SAFO13002 ; EASA : SIB 2013-05
[133] Id° 117
[134] Par ex. NASA Report, May 1995 : Pilot Opinions on High Level Flight Deck Automation Issues : Toward the Development of a Design Philosophy

transfert de l'ensemble des réservoirs vers les moteurs. Le suivi mental séquentiel ne peut plus suivre la complexité cachée des actions et des transitions programmées. Ainsi on s'est heurté avec surprise aux caractéristiques mentales de l'Humain.
La situation a évolué avec l'acceptation présente des automatismes, l'ergonomie cognitive et une formation appropriée s'étant imposées et ayant résolu tant bien que mal ce problème. Objectivement les automatismes restent au service des pilotes, n'étant encore que des prothèses même si elles sont de plus en plus sophistiquées.

Des prothèses

Prothèse, définitions : « ensemble des techniques ayant pour objet le remplacement partiel ou total d'un membre ou d'un organe », et : « la pièce ou l'appareil de remplacement ».
Sauf dans les exemples donnés par l'encyclopédie il n'est pas précisé s'il ne s'agit que de cas pathologiques et accidentels. Mais dans le principe il s'agit bien de donner à l'Humain la possibilité de récupérer les fonctions disparues, tout en lui laissant le pouvoir de les utiliser suivant sa volonté. L'appareil, la prothèse, est conçu et construit autour de l'Humain et pour son service et non pour remplacer son libre arbitre car il est encore et toujours difficile d'assimiler le cerveau à un organe remplaçable par une prothèse au service de l'Humain. Cependant le concept cité précédemment d'automatisme Humain intelligent pourrait être paradoxalement en désaccord apparent avec ce concept de prothèse au secours de l'Humain, lui-aussi un peu provocateur. Le point est traité plus loin.

Ici nous utilisons un concept étendu de prothèse pouvant donc surprendre par son extension au-delà de la définition initiale limitée à l'aide physique, mais intellectuellement correct par ses attributs d'aide globale à l'Humain. Il va ainsi de la récupération de fonctions à l'amélioration des possibilités humaines physiques et mentales, à leur augmentation, c'est-à-dire aux automatismes opérationnels. Il est important car il place ces derniers au service des pilotes sans les y asservir.
Il est intéressant de constater qu'en robotique les prothèses sont considérées comme pouvant **augmenter** les possibilités humaines, ce qui est notre cas.
De plus ce concept simplifie et clarifie les objectifs de ces automatismes et la façon d'y intégrer les humains, en évitant la multiple façon de les qualifier (passifs, actifs, de puissance, de calcul…)

Ainsi, concernant les automatismes trois sujets majeurs sont à traiter :

- (1) les fonctions à automatiser (au-delà de celles existant aujourd'hui)
- dans l'interfaçage des deux super-agents, le traitement de ses deux faces :
    - (2) la partie matérielle des postes de travail grâce à l'ergonomie physiologique et cognitive (commandes, informations, leur présentation et leur transmission, procédures)
    - (3) le comportement des pilotes (qualités et limitations mentales et physiologiques), la partie « automatismes humains ».

Sans vouloir chercher à entrer dans le détail des très diverses prothèses actuelles, telles qu'évoquées précédemment, nous verrons plus loin quelques exemples méritant de retenir l'attention.

Un important sujet de réflexion est la séparation entre les automatismes-prothèses servant à assurer les fonctions que notre connaissance peut maîtriser, par exemple grâce à « l'intelligence artificielle faible », et ceux restant à imaginer prenant en compte les fonctions non déterministes du cerveau, c'est-à-dire ce qui fonctionne déjà aujourd'hui en tant qu'**automatisme intelligent humain** cité plus haut, et qui correspondraient à une « intelligence artificielle forte ».
Cette réflexion est conduite surtout aux USA[135] mais pas uniquement[136]. Il s'agit de définir des structures d'autonomie s'appliquant à tous les appareils munis de commandes de vol électriques « *Fly-by-wire* », avec ou sans pilote à bord et/ou au sol.

[135] en particulier chez Sikorsky pour des missions militaires
[136] Piaggio P.1HH

Ces structures comprennent deux niveaux principaux de fonctions :

- Intelligence de bas niveau (*LLI, Low Level Intelligence*)
- Intelligence de haut niveau (*HLI, High Level Intelligence*)

En fait l'autonomie se rapporte aujourd'hui en gros au bas niveau avec l'ensemble des fonctions critiques du vol, incluant les perceptions, le contrôle du vol, les prises de décision concernant une mission déjà définie et planifiée dans un environnement supposé connu. Cela est encore essentiellement déterministe.
Notons que l'autonomie peut s'appliquer à des systèmes particuliers (par exemple le conditionnement d'air) ou à des systèmes de systèmes (comme l'ensemble de l'avion). La notion d'automatismes-prothèses peut s'appliquer à l'autonomie dans la mesure où cette dernière aide directement l'humain dans l'exécution de ses missions.
Mais on ne peut nier l'existence d'aléas de mission et il faut donc s'attaquer à une partie de comportement opérationnel non déterministe comme l'est typiquement l'adaptation à des situations imprévues. Et c'est là qu'intervient le haut niveau d'intelligence, non déterministe, dont on espère certifier un jour les logiciels, les algorithmes, celui qui prétendrait pouvoir assurer « l'intelligence artificielle forte ».
Ce haut niveau doit être capable :
- de comprendre une situation complexe par l'analyse et la combinaison de l'ensemble des informations captées,
- et de faire des choix entre plusieurs solutions possibles, sans en oublier et sans se tromper.

Il existe déjà aujourd'hui des logiciels capables d'un certain apprentissage en fonction des traitements antérieurs, capables ainsi de s'adapter à des situations non définies initialement. Mais quelle part de ces situations est enregistrée et prise en compte, avec quels objectifs, élémentaires ou généraux ?
Le risque est une insuffisante ou mauvaise interprétation des données conduisant à une réaction inappropriée, voire néfaste. D'où l'obligation d'introduire dans les logiciels des règles et garde-fous de façon déterministe. Alors où se cachera le non déterminisme des HLI ?

On travaille aujourd'hui pour que ce haut niveau non déterministe procure une autonomie pouvant remplacer l'automatisme intelligent humain, son cerveau. Là probablement s'arrêterait le concept de prothèse.
Mais la concrétisation est soumise entre autres à trois impératifs :

- la rentabilité économique
- un taux acceptable de risque. Par exemple s'agissant ici de missions militaires, un plancher de perte minimum identique à l'actuel pour les hélicos militaires de 1 par 100 000 heures de vol, ce qui est très au-dessous des objectifs de sécurité du transport aérien
- la certification du système.

On voit évidemment contre quoi butera ce programme : le traitement des situations indéterminées. Il est probable que l'évolution technologique permettra le traitement d'une partie de ce haut niveau dans une situation particulière et limitée grâce aux algorithmes provenant du retour d'expérience, d'une meilleure compréhension de situations complexes, mais ce sera toujours du déterminisme, de l'intelligence artificielle faible. Cela revient en fait à donner au cerveau, qui reste l'automatisme intelligent humain de haut niveau déjà cité, d'autres prothèses mentales, ce qui résout le paradoxe apparent cité.

La recherche de l'autonomie dans l'aviation est désormais un objectif affiché aux USA et en Europe.

Tendances actuelles

Aujourd'hui l'évolution des prothèses est bousculée par des nouveautés mettant en cause ce rôle d'assistance au profit de celui de remplacement. Ainsi :

- Pour des raisons surtout économiques le monde aéronautique étudie sérieusement la conduite des avions par un seul pilote à bord, avec l'idée de s'en passer plus tard. Ce point de vue a remplacé celui en vogue il y a 30 ans, qui était qu'au constat du nombre d'accidents et d'incidents graves impliquant des déficiences humaines (erreurs, oublis, limitations…) il serait préférable d'utiliser des automatismes fiables et sans état d'âme à la place d'humains.
  Mais on néglige soit par ignorance soit volontairement, les innombrables fois où les pilotes récupèrent des situations imprévues ou délicates, prévenant ou évitant ainsi des catastrophes ou au mieux des situations commercialement et financièrement coûteuses. Un chiffre moyen d'une par vol d'une telle intervention peut être avancé d'après une expérience personnelle, malheureusement sans confirmation rigoureusement quantifiée mais corroboré par d'autres estimations portées dans le Livret 5.
  Ainsi, en adoptant pour le transport à réaction les chiffres du Livret 1 de 0,37 accident mortel par million de vols et une participation humaine de 50% à ces accidents, cette participation négative serait de l'ordre de 0,18 par million de vols. Si on adopte une participation positive de 1 cas par vol, cela veut dire que **la participation humaine à la sécurité est 5 millions de fois plus élevée que celle négative amenée par ses déficiences**. Ce chiffre est à considérer sérieusement.
- La spectaculaire croissance de l'utilisation des drones permettrait de penser que l'Humain à bord n'est plus une nécessité. Ils sont encore de petite taille, parfois de taille moyenne pour les militaires, mais on peut garder « l'espoir » de les voir grossir.
- De façon concomitante l'automobile fait l'objet d'annonces spectaculaires et la robotique se répand dans la vie courante.
  En comparaison avec l'aéronautique l'autonomie de l'automobile mérite quelques commentaires :
  - Dans les deux cas le problème essentiel est le traitement du court terme, et pour la voiture du très court terme (la seconde). Ainsi la conduite au sol nécessite une attention permanente, de ce fait plus contraignante que dans un cockpit, obligeant le conducteur à maintenir son cerveau dans une constante vigilance, donc paré à l'intervention immédiate. Cependant il est directement et personnellement soumis au danger immédiat, ce qui constitue une excellente motivation à éviter les problèmes.
  - En revanche il est indispensable de rappeler que la voiture peut s'arrêter alors que l'aéronef ne le peut pas.
  - Autre différence importante, l'expérimentation au sol de la voiture autonome est aisée et très localisée, éventuellement régionale par exemple sur autoroute. En revanche l'évolution de l'autonomie de l'avion se fait obligatoirement sur la scène mondiale, ce qui nécessite plus de moyens et de précautions.
  - La jonction dans les deux domaines entre les réflexions sur l'autonomie devrait se faire au niveau de la neuropsychologie.
  - Dans les deux cas, aujourd'hui surtout pour la voiture, l'intelligence artificielle forte est requise pour le traitement de situations complexes, donc avec introduction de la notion d'apprentissage. Les solutions envisageables ne peuvent s'appliquer qu'à des cas simples, peut-être multiples en combinaison mais élémentairement simples, de façon déterministe.
- Comme déjà dit la capacité de calcul, disons les possibilités des calculateurs semblent augmenter sans qu'on aperçoive de véritables limites. Ceci est à rapprocher de l'extraordinairement rapide augmentation des connaissances sur le fonctionnement du cerveau, de ses fonctions et des capacités mentales.
  Il est aussi indispensable de se rappeler que les magnifiques prothèses-automatismes qu'on pense pouvoir extrapoler jusqu'au remplacement de fonctions cérébrales sont basées sur le calcul booléen de base 2, alors que les neurones de par leurs synapses et de leurs milliers d'interconnexions ont au moins des milliers de fois plus de possibilités de calcul parallèle et de choix, même si aujourd'hui le *IBM's TrueNorth neuromorphic chip* veut répliquer 1 million de neurones et 256 millions de synapses.

Nous reverrons plus loin les sujets mentionnés ci-dessus, lorsque nous tenterons de répondre à la question : face à l'automatisation généralisée quel rôle les humains désirent-ils ou peuvent-ils conserver dans la maîtrise opérationnelle du transport aérien ? Question qui se posera bien avant 2050, dépassant d'ailleurs le seul domaine de l'aéronautique.

Limitations opérationnelles humaines

Normalement les prothèses tiennent compte des caractéristiques humaines des personnes à qui elles sont destinées. C'est tout à fait vrai pour ce qui est physique, par exemple les servocommandes, l'ergonomie physiologique des cockpits. C'est beaucoup moins vrai pour le mental qu'on prend en compte comme déjà vu de façon pragmatique au travers des « facteurs humains » sans trop se poser de question.
Le plus souvent, dès que la technologie et les rentabilités (opérationnelles et industrielles) le permettent on conçoit un automatisme spécifique **à rajouter** aux autres, en respectant des règles compliquées de « facteurs humains », en définissant des procédures d'emploi testées en simulation.
Il faut noter que désormais l'existence du règlement EASA CS 25-1302 (Installed systems and equipment for use by the flight crew), ou de l'identique FAR 25-1302, permet une approche relativement rationnelle de ces facteurs humains. Pour le sujet traité ici, sa relation avec le CS 25-1309 (Systems and installations) reste à améliorer pour traiter l'intégration de l'ensemble des deux super-agents. On est encore loin de critères quantitatifs et concrets.

Quand surviennent des problèmes opérationnels la première cause invoquée dans les rapports concerne les pilotes : par exemple erreurs, manque de discipline dans l'application des procédures, défaut d'attention, formation insuffisante pour ne citer que les plus courantes.
En fait ce qui est en jeu dans les déficiences constatées est la conscience exacte de la situation et les réactions humaines appropriées dans deux cas principaux :

- perte de vigilance dans une évolution monotone, en croisière par exemple,
- survenue de situations inattendues, voire imprévues, à évolution rapide.

Ces deux cas relèvent des limitations cognitives, mentales, humaines banales ainsi que mentionné précédemment. Ces limitations sont désormais bien connues (actions conscientes séquentielles, mémoire à court terme, focalisation de l'attention, stress…) mais sont très rarement introduites formellement dans l'étude des systèmes, comme le sont par exemple la mécanique rationnelle ou la thermodynamique.

L'Humain mentalement remplacé

Avec des systèmes matériels lorsque les algorithmes corrects sont sélectionnés le diagnostic automatique peut être immédiat. Reste cependant le cas du choix entre plusieurs solutions possibles nécessitant des règles, pouvant devenir déterministes si elles sont liées à des situations connues et définies.

Déjà mentionnée l'évolution toujours croissante des capacités des mémoires matérielles permet de penser que le volume de mémoire concerné par le stockage des remplaçants des modèles mentaux ne sera pas une limitation. Cependant une caractéristique unique des modèles mentaux humains est leur adaptabilité à s'appliquer aux environnements. Ainsi lorsque les pilotes utilisent le même modèle mental à chaque phase finale de l'atterrissage, ils l'adaptent suivant le type d'approche, l'état de la piste, les conditions météo qu'ils soient à Roissy, à La Paz, ou la première fois sur un nouveau terrain.

Avec cette indispensable flexibilité d'autres problèmes sont à résoudre, comme :

- la définition du grand nombre de difficiles algorithmes
- leur extraction rapide et sélective des mémoires
- leur adaptabilité aux perceptions, aux situations
- leur possibilité d'assemblage sélectif en fonction des situations.

Il faudra vérifier les implications que cela pourrait avoir dans le contexte du remplacement fonctionnel des capacités humaines par des automatismes utilisant des capteurs physiques. On peut penser que le bilan pourrait conduire à des zones d'efficacité différentes de celles humaines, éventuellement meilleures dans certains cas.

L'importance des perceptions est primordiale dans le traitement de l'inattendu, pour l'obtention d'une conscience correcte de situation. L'étude des capteurs de situation et d'état, de leur adaptation aux logiciels, de leurs limitations, de la combinaison de leurs paramètres est l'une des clés majeures de l'autonomie.
Le raffinement des capteurs d'environnement amènera certainement des possibilités accrues d'utiliser des automatismes concurrents ou complémentaires pouvant augmenter l'autonomie des aéronefs, mais il restera toujours une part de non–déterminisme pouvant déboucher sur des situations à haut risque.

L'avantage d'une mémorisation matérielle est d'offrir des possibilités de traitement de tâches élémentaires affranchies de cette limitation humaine. Cependant le traitement en parallèle de solutions possibles avec leur simulation ne peut s'affranchir d'avoir quelque part un traitement séquentiel statistique de combinaisons et de choix. Le processus temporel cognitif humain de reconnaissance de situation suivie de diagnostic et de choix de solution est rapide et complexe. C'est là où il sera peut-être difficile de concevoir un calculateur matériel capable de rivaliser avec un tel fonctionnement mental.

Ainsi, au vu de ces analyses, on peut se poser quelques questions au sujet de la « fonction cognitive » d'un système autonome. Que deviennent pour lui les notions clés du fonctionnement neurologique humain, d'attention, de conscience et de subconscience, de conscience de situation ? Ces notions auront-elles un sens pour des équipements matériels, disons plutôt pour ceux qui les concevront ? Par quoi seront-elles remplacées dans les processus de conception ?

Comme pour l'Humain les systèmes matériels ont aussi des limitations, des saturations.
Ce serait aux grands maîtres de l'intelligence artificielle, ou de la super-intelligence artificielle, de répondre à ces questions. **Ou peut-être plus simplement aux ingénieurs.** La fonction cognitive à remplacer est complexe. Ainsi que déjà vu elle détecte l'anormalité et mobilise l'attention. Elle rassemble et enregistre les perceptions instantanées, et, en fonction de l'objectif (résoudre le problème qui surgit), va chercher dans les mémoires les modèles mentaux paraissant pertinents suggérés par la situation identifiée grâce aux perceptions, parfois aussi par l'intuition (bonne ou mauvaise), pour lancer un processus de diagnostic de correction avec simulation ultra-rapide de résultats lorsque plusieurs solutions se présentent. Une estimation probabiliste définit d'abord le diagnostic puis le choix de l'action sur la solution retenue.

Le processus humain se déroule en séquences sur la mémoire court terme avec le danger de la focalisation parasite. Les automatismes ne sont pas exposés à de telles limitations. En revanche le processus doit être rapide pour éviter la divergence irrécupérable d'une situation dangereuse.

On voit rapidement les points délicats : le processus temporel impliquant la reconnaissance exacte de la situation et le choix d'une action appropriée. Intéressant chapitre à ouvrir dès à présent.

Exemples de prothèses mentales

La plupart des déficiences ne se manifestent que rarement, lorsque le temps imparti à la correction d'une situation difficile est limité par la rapidité de son évolution. L'intégration pragmatique de l'Humain dans l'élaboration des automatismes a résolu la plupart des problèmes potentiels, cependant sans tous les éliminer comme le montrent quelques exemples. L'introduction des principes, ou plutôt des règles de fonctionnement de l'Humain automatique peut donner des pistes d'amélioration de ses prothèses.
Ainsi qu'on le verra ci-après des solutions exigent objectivement l'abandon difficile et délicat de standards actuels (d'habitudes, de dogmes ?).

Nombre élevé d'informations de conduite du vol

Les présentations sur écrans sont l'aboutissement de décennies d'expérience, et le résultat d'une sorte de standardisation, par exemple sur le PFD le « T basique » de vol aux instruments, de présentation des paramètres quantitatifs vitesse/assiettes/altitude/cap défini il y a 70 ans.
La vision est de loin le premier canal cognitif de captation des informations. L'ergonomie des présentations a autorisé la meilleure perception possible de ces informations par l'utilisation des contrastes de formes, de couleurs et d'intensités. Au point qu'on a ajouté avec le temps des paramètres tels que certaines variations (Vz, accélération…), les objectifs sélectés par les pilotes (cap, altitude…), les indications du FD, de l'ILS, etc. Avec aussi la possibilité de surimposer la figuration egocentrée de vision extérieure rapportée ou synthétique (radar, caméra infra-rouge, données enregistrée…).

A juste titre on donne aux pilotes l'accès à tous les paramètres susceptibles de leur servir dans leur mission.
Pour la gestion de la trajectoire le PFD, instrument de pilotage à court terme de l'immédiat à environ une minute, présente pour une situation de vol donnée environ 30 informations de natures diverses (quantités numériques, tendances et dérivées mathématiques de leur évolution, objectifs chiffrés, états repérés symboliquement de fonctions et de systèmes).
Le ND (*Navigation Display*), instrument de pilotage tactique à moyen terme, jusqu'à environ 40 minutes d'anticipation, concernant la projection horizontale de la trajectoire prévue, ses repères et ses obstacles, présente aussi environ 30 informations dont la situation météo donnée par le radar.
Le VD (*Vertical Display*), associé au ND, donne le complément de la trajectoire dans le plan vertical avec environ 10 informations supplémentaires.
L'ECAM, donne les indications de poussée et de limitations des moteurs avec environ 10 informations pour 2 moteurs, ainsi que de nombreuses informations sur les configurations, les systèmes et les procédures en conditions de panne.

L'ergonomie très soignée et efficace permet aux pilotes correctement formés de traiter les situations normales et anormales, dans des situations temporelles leur permettant de trier et de consulter les informations appropriées à la situation présente, sous réserve que ce temps ne soit pas un paramètre limitatif.
Cependant lorsqu'une situation évolue rapidement le temps disponible peut s'avérer très court (quelques secondes à 1 min) et, quand l'inattendu et l'effet de surprise se surimposent, le tri et la perception d'informations trop nombreuses deviennent compliqués et se heurtent aux limitations mentales déjà citées. D'où perte de temps d'action et fréquemment blocage mental.

Bien qu'encore non répertorié quantitativement ni pris en compte systématiquement dans la conception des cockpits ce phénomène est connu et des solutions sont proposées, telles que le masque des paramètres non pertinents ou la mise en contraste des paramètres pertinents. Ces solutions se heurtent à l'obligation difficile du tri automatique instantané de ces paramètres en cohérence pertinente avec la situation présente.
En revanche il est certainement possible avec la technologie présente de présenter de façon synthétique les quelques 80 informations utiles au traitement immédiat d'une situation pour n'avoir à trier et à juger que 20 à 40 informations pertinentes de façon simple, rapide, « *affordantes* » pour utiliser une notion vieille de 30 ans dont on ne parle plus. Mais cela implique l'abandon des standards actuels au profit de nouveaux, ainsi que des études et des implications industrielles importantes. Le pas à franchir semble gigantesque, bousculant les pratiques acquises, sauf si l'on fait évoluer cette sorte d'innovation de façon mondialement acceptable, ce qui peut prendre du temps et nécessite une vue stratégique cohérente.
Il faut noter par exemple que la présentation des trajectoires immédiatement prévisibles bénéficie déjà de solutions 3D en usage dans l'aviation d'affaires[137].
On peut prévoir que cette solution de synthèse s'avèrera nécessaire dans la réduction du nombre de pilotes à bord.

[137] Par ex: Honeywell IPFD on Gulfstream bizjets, 2008. Universal Avionics' King Air 350, 2008

La connaissance des états, des configurations et des modes des automatismes en fonctionnement est essentielle pour une exacte conscience de la situation lorsqu'on les utilise, en particulier quand la situation leur fait changer rapidement de mode de fonctionnement. D'où le positionnement privilégié de ces informations sur le PFD dévolu au court terme, sur le bandeau FMA (*Flight Mode Annunciator*). Elles sont ergonomiquement codées et présentées, utiles surtout quand elles signalent des changements. Trois faiblesses sont constatées :

- Le traitement cognitif simultané non intuitif des paramètres quantifiés de pilotage et des représentations symboliques de modes de fonctionnement sur le même instrument exige une formation spéciale.
- Dans des changements rapides de configurations, dans des situations à évolution rapide, le suivi des changements des modes est indispensable pour avoir une conscience correcte de situation. Or c'est aussi dans de telles situations que le suivi des paramètres quantitatifs de conduite est prioritaire, conduisant fréquemment dans l'urgence à laisser de côté la consultation visuelle du FMA, par exemple en RDG, malgré les procédures prescrites et la formation prodiguée.
- L'accès à la documentation électronique sur écrans est parfois difficile avec le port de masque à oxygène, avec fumée dans le cockpit, ou simplement en urgence.

Conduite des systèmes

La situation semble correcte pour les systèmes de l'avion où l'automatisme est déjà en place et où l'intervention humaine consiste à contrôler l'absence d'anomalie (panneau « noir ») ou à confirmer une action automatique, à modifier certains paramètres et à n'intervenir qu'en cas de panne signalée conformément à des « *do-lists* » automatisées. Il faut noter qu'il y a 40 ans l'application automatique des actions de correction des pannes avait été envisagée puis abandonnée au profit de la décision volontaire des pilotes pour des actions impliquant la sécurité. Les systèmes étaient encore analogiques.
L'homogénéisation des présentations et des commandes est bonne. Cependant des cas de fonctionnement rares ou compliqués peuvent soit ne pas être signalés, soit restés incompris. Evidemment l'accès à l'information détaillée existe avec la consultation de la documentation de bord informatisée, à condition que les conditions de visibilité (par ex. masque à oxygène, fumée) et que le temps imparti le permettent, et qu'il n'y ait pas de blocage imprévu dans le déroulement des *do-lists* à exécuter (cas de l'incident moteur de l'A380 de Qantas). Ce point est à considérer dans l'autonomie complète des systèmes qu'il faut malgré tout contrôler.

Bien que dorénavant utilisé partout dans le cockpit pour ses nombreux avantages, il faut signaler un grave défaut de l'utilisation des touches alphanumériques de commande de configurations et de paramètres. Malgré les précautions prises une erreur de manipulation peut avoir des conséquences sérieuses irréversibles comme la perte définitive des indications d'un instrument. Le FMS est une excellente source de problèmes en situation de distraction ou de tâches multiples.
La perte simultanée de systèmes redondants est rare mais survient de temps en temps, provoquant des situations difficiles à traiter (par ex. FMS, sondes aérodynamiques).

Conduite de la trajectoire

Les problèmes majeurs se trouvent dans la conduite de la trajectoire, dont on passe ici certains en revue. Du début du décollage à la fin de l'atterrissage les lois physiques de la mécanique du vol régissent et conditionnent le vol. Les automatismes, par leur faculté de traiter simultanément et de façon continue plusieurs paramètres contrairement aux humains (et à leurs « automatismes »), s'en occupent théoriquement mieux que les pilotes, excepté que :

- ils utilisent des capteurs ayant des limitations physiques parfois contraignantes (par exemple sensibilité au givrage, champ de vision limité…)
- ils ont été conçus et construits par éléments ajoutés, présentant ainsi quelques « trous » de fonctionnement dans des cas non prévus ou exclus parce que réputés improbables (par exemple automatismes liés au FD quand le pilote ne suit pas les indications de ce dernier)

En pilotage manuel les pilotes contrôlant la trajectoire doivent se plier à ces lois physiques, ce qui nécessite l'acquisition et le maintien d'aptitudes spécifiques (introduction de fonctions automatiques de haut niveau de savoir-faire). Cependant en se basant sur l'utilisation permanente des automatismes et sur la rareté statistique des situations critiques liées à cette utilisation on a pensé pouvoir faire des économies de formation des pilotes et se passer d'une part de leur formation basique en connaissances et habiletés. Compte tenu d'accidents récents la communauté aéronautique réagit aujourd'hui contre cette tendance.

Commandes directes

Elles permettent aux pilotes d'intervenir sur les organes initiant les mouvements, gouvernes aérodynamiques et orientation des roues au sol, autorisant ainsi la **commande immédiate** des mouvements de l'avion conformément à une boucle d'asservissement direct pilote –avion de faible constante de temps (0,1 à 5 sec), qu'on appelle pilotage manuel.
Ce type de pilotage fait intervenir les aptitudes humaines des pilotes, apprises en formation de base, en qualification de type et par expérience.

Aujourd'hui le manche latéral (ou le volant) est la commande majeure permettant de maîtriser les paramètres de conduite, initialement les assiettes longitudinales et latérales, ou de façon plus élaborée le facteur de charge et la vitesse de roulis. Evidemment entre le manche manié par le pilote en fonction (PF) et les paramètres de conduite, existent des prothèses évoluées introduisant des boucles complexes coordonnées d'asservissement à faible constante de temps. De même, côté humain, il existe d'autres bouclages complexes utilisant les perceptions sensorielles d'entrée (vue, audition, mouvements, toucher…) et de sortie (efforts sur le manche, retours de contrôles visuels et tactiles…). Ceci concerne le cas particulier du phénomène de *PIO* déjà évoqué.

En vol le comportement en lacet de l'avion contrôlé par la gouverne de direction est automatiquement coordonné avec l'évolution latérale, par exemple en virage ou en cas de compensation de panne d'un moteur. Du fait de la faible utilisation des pieds, du palonnier, au cours d'une mission cette utilisation pourrait être remise en question quand on veut faire des économies de poids et d'encombrement. Doit-on, peut-on l'éliminer, même dans le contrôle au sol (décollage, atterrissage, roulement) et le freinage différentiel ? Cela nécessite une automatisation poussée du contrôle de la phase de roulement (vent de travers, décrabe d'atterrissage, évitement d'obstacles, transitions entre vol et sol par exemple). Peut-on utiliser les mains dans ces fonctions ? Une étude poussée des fonctions mentales séquentielles humaines et du contrôle des actions est nécessaire avant toute prise de décision.

Quelques exemples où il serait utile d'augmenter l'apport des prothèses :

- Rendre plus automatique le roulage au décollage. Mais comment prendre en compte l'ensemble des aléas, piste plus ou moins polluées, oiseaux, obstacles imprévus, pannes, etc ?
- Rendre automatiques tous les cas d'atterrissage. Par exemple avec vents de travers de 40 kt et forte turbulence, ou avec pannes de systèmes quelles qu'elles soient.
- Rendre les reprises de contrôle simples en cas de panne d'automatismes de contrôle de trajectoire. Par exemple problèmes de changement de lois de pilotage ou de fonctionnement avec absence de protection, ou de suppression brutale d'automatisme. Faut-il que ces automatismes restent opérants de façon permanente ? L'A350 présenterait une avancée sur ce point.

La reprise de contrôle direct de trajectoire par les pilotes restera (longtemps ?) obligatoire tant que la liste des situations pouvant se présenter en urgence reste diverse, incertaine et imprévue malgré l'énorme banque de cas répertoriés mais pas toujours pris en compte.

Le contrôle de l'énergie est un point essentiel. Il intervient dans les accélérations et décélérations en vitesse et dans les évolutions dans le plan vertical par les échanges entre énergies potentielle et cinétique. Comme mentionné plus haut il est notoire que les pilotes ont moins de facilité à gérer la partie verticale

des trajectoires que la partie horizontale, et à intégrer les échanges rapides d'énergie se présentant à eux, à maîtriser les variations rapides en agissant simultanément sur les paramètres vitesse/altitude/assiette longitudinale/vitesse verticale/poussée. En particulier les variations de vitesse sont dues de façon simultanée aux variations de poussée et d'altitude ce qui est parfois oublié. Le contrôle automatique de poussée asservi à la vitesse améliore cette maîtrise. Cependant lorsqu'il est aussi associé aux variations d'énergie, en descente et en remise de gaz en particulier, il peut provoquer des confusions de modes de fonctionnement[138].

Ainsi grâce au pilotage direct le pilote maîtrise le vol dans les situations exigeant une réaction immédiate, ce qui lui permet d'intervenir directement dans des problèmes urgents et/ou délicats de sécurité, par exemple évitement d'obstacles ou atterrissage en conditions extrêmes non prises en compte par les automatismes. **Cependant ce pilotage direct peut ne pas rester ce qu'il est aujourd'hui comme nous le verrons plus loin.**

Suivi conscient des modes automatiques

Ainsi que déjà vu il est essentiel que les pilotes soient conscients des modes actifs de fonctionnement des automatismes, et surtout de leurs changements, réversions et déconnexions automatiques. En fait, avec cette connaissance exacte de situation il faut aussi, et cela est primordial, qu'ils aient **confiance dans le bon fonctionnement des automatismes** dans la situation immédiate où ils se trouvent. La complexité des fonctions, de leurs interconnexions, de leurs limitations, n'autorise pas aujourd'hui la conscience totale et immédiate de l'état des automatismes dans les situations à évolution rapide. Le FMA situé sur le PFD est conçu pour que les pilotes aient cette conscience en toutes circonstances, **lorsqu'ils peuvent le regarder**. Nous avons déjà vu des limitations à l'exploitation de ces informations : lecture en situation difficile avec obligation d'actions amenant l'attention hors du FMA, difficulté mentale d'exploitation d'informations inattendues.
Un gros effort est à accomplir sur ce point, surtout si l'on veut restreindre le nombre de pilotes à bord.

Mais un phénomène dangereux est apparu à l'usage avec la suppression inattendue des protections automatiques dans des cas estimés de faible occurrence mais où la récupération est soumise à la détection des pilotes, à leur interprétation et à leur intervention suivant des procédures.
C'est le cas de la suppression de la protection de domaine de vol en passage des lois de commandes de vol en mode dégradé. Ou bien celui de la déconnexion des pilotes automatiques à l'atteinte de leurs limites. Lorsque ces cas surgissent en situations critiques, certes estimées peu probables, le problème est que cette suppression de protection ou d'aide automatique au pilotage survient à des moments où elles seraient le plus utiles aux pilotes. Cela signifie qu'il est essentiel de changer de politique vis-à-vis des cas à la fois dangereux et improbables : **plus leur occurrence est improbable plus il faut soigner leur récupération** si elle est soumise à une action consciente des pilotes.

Un remède serait l'impossibilité en toutes circonstances de déconnecter des automatismes de protection ou de pilotage automatique. Avec l'A350 Airbus s'oriente vers cette solution, techniquement difficile car elle augmente la complexité interne des équipements.

Cas de l'incidence

L'incidence est le principal paramètre aérodynamique. Elle régente les caractéristiques aérodynamiques des avions, et leur impose des limitations opérationnelles draconiennes fonctions de l'altitude (densité d'air) et du nombre de Mach : limites de décrochage aérodynamique des voilures et empennages. Son influence est directe sur les performances opérationnelles.
Une relation simple la relie en vol stabilisé et atmosphère calme aux paramètres de conduite dans le plan vertical, assiette longitudinale et pente de la trajectoire :

assiette longitudinale = incidence + pente

[138] Asiana Flight 214 July 6, 2013

Cette relation simple enseignée dès la formation initiale, était autrefois largement utilisée en calcul mental.
Aujourd'hui l'incidence est rarement présentée directement au pilote (excepté sur des avions militaires et dans certaines versions d'avions Boeing, Airbus et d'aviation d'affaires). Sur Concorde l'indicateur d'incidence était utilisé de façon opérationnelle.
En revanche son influence est indirectement présentée de façon quantifiée sur les paramètres de conduite adoptés mondialement dans l'aviation de transport, par exemple :

- repérage des vitesses correspondant à des incidences données (par ex. *V green dot,* vitesse de finesse maximale),
- repérage de l'approche des vitesses de décrochage aérodynamique.

Des systèmes automatiques de protection d'approche des incidences élevées existent **quand les systèmes les supportant fonctionnent** (lois de pilotage « normales » des commandes de vol).

Cependant alors qu'assiette et pente sont liées aux références sol, l'incidence dépend de références air et entre les deux systèmes référentiels se trouve l'atmosphère en mouvement par rapport au sol (vent, turbulence, *wind-shears*).
L'assiette, aujourd'hui paramètre de conduite, rend compte de mouvements et de position par rapport au sol. Les gouvernes aérodynamiques imposent des variations d'incidences instantanées identiques à celles de l'assiette longitudinale, et ces variations d'incidences induisent les variations des forces aérodynamiques incurvant la trajectoire en combinaison avec les forces d'inertie. Cependant alors que les mouvements rapides de l'assiette induisent des variations d'incidence cette dernière est influencée aussi par les mouvements propres à l'air ambiant (turbulence par exemple), filtrés par l'inertie de l'avion, ce qui a contribué à préférer l'assiette longitudinale à l'incidence comme paramètre de conduite.
Une solution introduite par Airbus sur l'A320 règle le problème de conduite de trajectoire de façon intelligente en donnant aux ordres de pilotage l'exigence de commander directement le facteur de charge, c'est-à-dire l'inflexion de la trajectoire (ce que demande le pilote), en demandant aux automatismes de résoudre les complexes équations intermédiaires du vol. De plus le contrôle du vecteur-vitesse de l'avion par rapport au sol (ce que demande aussi le pilote) est donné directement par rapport à l'horizon et à la route suivie (dont la pente par rapport au sol) grâce à sa trace sur l'indicateur d'assiettes. Mais l'incidence est oubliée.

Sa représentation pourrait se placer aisément (voire simplement) si l'assiette longitudinale n'était plus le paramètre principal de conduite au profit du vecteur-vitesse et si les figurations traditionnelles actuelles étaient abandonnées au profit d'autres plus conformes aux demandes réelles des pilotes, sinon synthétiques. Difficile de se débarrasser des habitudes.
Ainsi le problème de son association avec les paramètres classiques de conduite oblige à innover, mais **sa représentation mentale** correcte chez le pilote est aussi indispensable que sa représentation physique sur le tableau de bord. C'est justement ce qui manque aujourd'hui dans la formation de base des pilotes et dans la présentation qui leur est faite de la dynamique du vol.

Le directeur de vol (FD), le pilotage par objectifs

Aujourd'hui le directeur de vol précise au pilote les actions que les automatismes définissent comme nécessaires d'après les données qu'il leur assigne. Comme il est plus facile de maintenir des aiguilles en croix que de « chasser » les paramètres élémentaires de vol (cap, altitude par ex.), en suivant traditionnellement ses indications en pilotage manuel le pilote n'agit alors que comme substitut d'automatisme dans la chaîne de commande de la trajectoire, rôle peu gratifiant menant logiquement à l'idée que son élimination de l'avion serait possible.
Malgré la simplification apparente obtenue en pilotage manuel, son suivi peut nécessiter une attention soutenue, obligeant ainsi que déjà vu à négliger d'autres paramètres essentiels dans la gestion de la conduite, vitesse, altitude, positions ILS, etc. On peut se demander comment un tel système, utile en tant qu'organe de contrôle du fonctionnement correct des automatismes de conduite, peut encore survivre dans les cockpits pour « donner des ordres » de pilotage manuel. Il est comme le **T** basique du pilotage sans visibilité un vestige des premiers temps des prothèses, d'il y a 60 ans.

Mais les rôles du pilote et de sa prothèse FD peuvent être reconsidérés. Au lieu de demander avec ou sans FD au pilote cette résolution compliquée de la physique du vol qu'il a toujours de fortes chances de rater sous stress, la technologie pourrait la prendre en charge de façon fiable, en laissant au pilote ce qu'il peut beaucoup mieux faire que les automatismes : le choix et la décision de la trajectoire à adopter. Si en pilotage manuel le pilote commandait directement un objectif à atteindre, en choisissant et en désignant visuellement cet objectif, par exemple l'axe et le point sur la piste où le vecteur vitesse de l'avion doit se diriger, et en laissant les automatismes asservir le vecteur vitesse de l'avion sur la trajectoire ainsi choisie par le pilote, on inverse les rôles en les distribuant à ceux ayant la meilleure compétence. Ce type de directeur de vol qu'on peut baptiser "Contrôleur d'objectif de vol" ("*Flight Target Controller*") ne supprime pas un contrôle direct manuel, **qui restera obligatoire dans certaines circonstances avec des passagers à bord**, mais le rend plus simple, plus efficace et sûr.
On rappelle que ce guidage commandé est apparenté à celui ultra-précis de certains missiles air-sol et bombes guidées utilisé avec succès par les militaires.

Grâce à cet exemple on vient naturellement aux changements de fonctions de pilotage direct de la trajectoire à attribuer à « **l'automatisme humain intelligent** », celui des pilotes.

Ici nous devons introduire une notion encore peu assimilée mais qu'on détecte à l'analyse des incidents liés à l'utilisation des automatismes, celle de **falaise** de difficultés se présentant face au pilote dans une situation d'urgence immédiate, lorsque subitement le confort de l'autonomie disparait, ne laissant subsister que le choix ultime de la commande directe pour éviter la catastrophe, par exemple la perte totale d'alimentation électrique ou celle de la propulsion. Les systèmes sont évidemment étudiés pour que ce genre de situations soit relégué aux confins des probabilités d'occurrence, mais on constate à l'expérience qu'elles existent. Une démarche pourrait consister à définir les systèmes de dernier secours d'après les pannes les plus sévères possibles sur un type d'avion. Et là se pose le problème de l'intervention positive du pilote, en fonction des aptitudes et des limitations vues précédemment.

Communications vocales

Nous avons déjà évoqué les performances problématiques des commandes vocales.
En communication sol-bord, il y a 30 ans ou plus la FAA a mené une enquête sur le temps de réaction des pilotes à une demande ou à une injonction de l'ATC. Le résultat était que le message écrit était perçu avec un délai environ 50% plus long qu'avec le même message audio.
En revanche l'écrit devenait nettement plus sûr d'exploitation par élimination des problèmes de compréhension des voix et accents.
Aujourd'hui il semble admis que les messages routiniers doivent faire l'objet d'une transmission écrite soumise à l'approbation des pilotes, parfois doublés par une transmission audio si l'importance le requiert. En revanche les messages d'urgence sont toujours à transmission audio.

L'évitement d'obstacles

Les systèmes d'évitement de mobiles aériens existent (TCAS). Ils ont nécessité plusieurs décennies d'expérience pour qu'on puisse finalement les automatiser. Cependant ils ne traitent que les cas où les mobiles portent des transpondeurs ce qui aujourd'hui exclut de nombreux aéronefs de l'aviation générale et les drones de petite taille, le plus souvent évoluant à basse altitude.
L'évitement d'obstacles au sol est pris en compte par des systèmes EGPWS pouvant gérer automatiquement les manœuvres d'évitement. Il faut se rappeler les réticences initiales à utiliser les premiers systèmes GPWS de fiabilité insuffisante provoquant des demandes d'évitement injustifiées. Cette exigence de fiabilité est primordiale pour pouvoir accorder la nécessaire confiance aux prothèses garantissant la sécurité.

Une avancée sérieuse est observée dans le domaine militaire aux USA avec un système autonome d'évitement de collision air-air et air-sol *Auto ICAS* (*automatic integrated collision avoidance system*)

combinant les *Auto ACAS* (*air*) et *Auto GCAS* (*ground*), utilisable sur les avions à commandes de vol électriques (F16, F22, F35). Le système utilise le radar de bord et les données numériques de relief comme base de calcul pour un logiciel très élaboré donnant un évitement automatique 1,5 sec avant une situation irrécupérable.

Tâches et procédures

Les raisons de l'équipage à deux pilotes dans l'aviation de transport ont déjà été évoquées dans les chapitres de fiabilité humaine.
Il se trouve encore des déficiences opérationnelles.

Dans un équipage à deux le rôle du pilote non en fonction (PNF) est primordial dans sa tâche de surveillance des situations et de détection des anomalies.
Cependant il faut noter qu'on assigne à ce PNF des tâches spécifiques à mener, pour de nombreuses raisons dont celle qu'il est exclu de payer un pilote qui ne fasse rien d'autre qu'observer, et en conséquence son attention est loin d'être prise à 100% par sa fonction de contrôle. Ainsi en pratique la formation du PNF est beaucoup plus axée sur l'enseignement de ses tâches spécifiques en équipage à deux que sur cette fonction de contrôle, malgré l'introduction de cours obligatoires de CRM, « *Crew Resources Management* », où l'on essaie d'enseigner l'entraide entre pilotes.
Lorsqu'on analyse ces tâches spécifiques de PNF, complémentaires à celles du PF et certifiées par ailleurs, on peut parfois constater qu'une partie pourrait être prise en compte par des automatismes, par exemple les manœuvres des hypersustentateurs en remise de gaz.

Un autre cas préjudiciable à cette fonction de contrôle est celui où le PNF est le commandant de bord, lorsque ses responsabilités de commandement prennent le pas sur ses fonctions de contrôle et rendent incompatibles ses tâches de PNF, au détriment de la répartition des tâches en équipage car alors le pilote en fonction (PF), le copilote, doit exécuter seul l'ensemble des tâches prescrites aux deux[139].
Ainsi la répartition des tâches dans le cockpit ne doit pas correspondre seulement à des impératifs techniques à analyser pour des prises en compte automatiques éventuelles, mais doit intégrer la fonction de contrôle réciproque dans toutes situations, et considérer les incompatibilités éventuelles de fonctions.

Les bureaux d'études doivent concevoir les systèmes pour que les procédures d'urgence soient simples et rapides, si possible intuitives (principe d'« *affordance* ») afin de solliciter les boucles rapides d'intervention mentale de l'automatisme humain. Cette exigence est prioritaire dans les situations à évolution rapide et dangereuse.
Mais de toute façon comme il est impossible aux pilotes d'utiliser les checklists et procédures en toutes circonstances ainsi que démontré par une étude (Eurisco, 1996), là-aussi des automatismes de contrôle peuvent être envisageables, ce qui est déjà fréquemment le cas.

La concomitance de plusieurs tâches prioritaires peut conduire à des oublis, et la complexité des procédures est source de durée parfois prohibitive dans leur exécution (par ex. cas de l'explosion d'un moteur).
L'idée d'avoir recours à des règles de conduite et/ou de contrôle plutôt qu'à des check-lists ou des « *do-lists* » en cas de confusion ou de manque de temps n'est pas nouvelle mais l'augmentation de la complexité des systèmes et de leur interdépendance dresse un obstacle de plus en plus redoutable à une compréhension simple et aisée des situations anormales, donc à leur résolution. La prise en compte des possibilités et limitations cognitives est nécessaire dans toute étude ou analyse de cas ou situation complexes, résolus ou non de façon automatique. Ce point concerne aussi l'aptitude des pilotes à appliquer correctement des règles forcément plus générales et moins détaillées que des procédures (*Golden Rules d'Airbus Training*).

[139] Id° 117

La météo à bord

La prothèse « météo » serait d'une grande aide dans la prévision des facteurs influant sur la mission et dans la prévention et l'évitement des dangers potentiels ou rencontrés.
Aujourd'hui environ une dizaine de documents traitant de facteurs divers (températures, hygrométrie, vent, etc.) et de leur prévision d'évolution sont utilisés pour une mission, souvent nécessitant une mise-à-jour permanente en cours de vol.
Leur présentation synthétisée et révisée en permanence est souhaitable, imposant la transmission des informations recueillies et traitées dans les centres au sol.

Les radars météo sont de plus en plus performants en sélection automatique de situations potentiellement dangereuses. La prévision et surtout la détection des turbulences et des cisaillements de vent, phénomènes locaux de variations rapides, sont encore à leurs débuts.

En fait ce problème de la météo présentée de façon opérationnelle et efficiente aux pilotes mérite plus qu'une simple mention, une véritable étude mondiale. Et c'est là qu'est le problème car aujourd'hui les pilotes le traitent vaille que vaille en général sans trop de difficultés apparentes car les paramètres en cause ne nécessitent que rarement leur traitement en urgence, **sauf dans les cas dangereux inattendus ou inévitables** (turbulences sévères, givrage, orages, cisaillements de vent, bancs de brouillard…).
Peut-on automatiser la prévention et l'évitement ? Comment ?
Aujourd'hui on s'intéresse activement à solutionner la mise à jour en vol des paramètres intéressant les performances.

4ème partie : DIMINUTION de l'EQUIPAGE à BORD

Situation duale évolutive Humain-automatismes

Introduction

Se projeter dans le futur n'a rien de scientifique. Nous ne pouvons qu'essayer de projeter les tendances que nous observons (l'observation est objective), que nous extrapolons (ce qui l'est moins), ou que nous devinons (ce qui ne l'est plus beaucoup).
Arrêter notre horizon à 2050 est sage bien que téméraire, mais insuffisant au regard des bouleversements sociétaux, écologiques et techniques de niveau planétaire que nous soupçonnons. Alors essayons de mêler la logique à l'observation pour guider le déchiffrage de la boule de cristal embrumée.

Les premières parties du chapitre s'intéressent à l'évolution « technique » du couple pilote/avion, à ce qui semble nécessaire de respecter pour que ces deux agents fonctionnent ensemble du mieux possible en matière de sécurité et d'efficacité, sans préjuger de la position de l'agent pilote, à bord et/ou au sol.
Nous simplifions en ne retenant que des cas et situations enveloppes, ce qui sera forcément critiquable mais montrera clairement des limites dans les choix potentiels.
La dernière partie essaie de placer cette évolution du couple dans la réalité du monde aéronautique, en essuyant la boule de cristal pour en augmenter la vision et en gardant en mémoire que l'humain n'est pour le moment que très peu modifiable, dans les limites des seules fonctions de son cerveau accessibles à l'éducation/formation.

Retour en arrière

Le navigateur a été supprimé du bord grâce à la détection précise et immédiate de la position de l'avion, de l'utilisation de détecteurs fiables des paramètres de vol, du calcul immédiat des paramètres de conduite et des prévisions opérationnelles, de leur présentation ergonomique aux pilotes. Cela fut rendu possible par les avancées scientifiques et technologiques appliquées aux systèmes matériels. Il faut

remarquer que les navigateurs n'avaient pas à prendre les décisions de navigation de la responsabilité du commandant de bord, du pilote. Les systèmes ont donc remplacé sans problème majeur la totalité des fonctions du navigateur, essentiellement d'exploitation de données physiques.
L'élimination du mécanicien navigant fut un peu plus délicate, la variété des systèmes gérés et leur implication directe dans la sécurité immédiate de l'avion ont obligé à des études poussées sur la fiabilité et l'ergonomie des équipements autorisant un fonctionnement sans conduite directe humaine. Là aussi il ne s'agissait que de systèmes matériels maîtrisables.

Cependant les pilotes gardent la responsabilité du contrôle de la mission, et la possibilité d'intervenir et de modifier les objectifs. Ces deux fonctions doivent-elles rester sous responsabilité humaine ? Peut-on imaginer leur prise en compte automatique en toutes situations ?
Ce point est traité plus loin, au sujet de l'autonomie.

Dans les deux cas précédents d'élimination d'un membre d'équipage il faut noter que la grande majorité de leurs tâches a été prise en compte par des automatismes mais pas toutes, en particulier des fonctions de sélections de modes principaux, de contrôle de pannes avec manipulation de commandes, avec choix éventuel de la « moins mauvaise solution » ; par exemple, survolant l'Himalaya sans possibilité de descendre vers une altitude permettant le vol sans pressurisation, faut-il arrêter le Pack 2 de conditionnement d'air se signalant en difficulté, la procédure exigeant son arrêt, lorsque le Pack 1 s'est déjà arrêté avec panne ; alors…?

Démarche suivie

Dans cette partie il serait possible de ne pas faire de distinction entre le retrait d'un pilote ou celui de deux pilotes à bord, car nous verrons plus loin que la solution d'un seul pilote à bord conduit dans certaines circonstances à un avion obligatoirement certifié sans aucun pilote à bord, certes avec des nuances suivant le type d'évènement à prendre en compte.
Jusqu'à présent nous n'avons considéré que l'apport de prothèses améliorant la gestion humaine de la mission, dans le droit fil de l'évolution en cours. Or une étude américaine citée ci-après et les tenants de l'intelligence artificielle forte spéculent résolument sur le remplacement radical à terme de l'humain dans la conduite de la mission, éventuellement avec l'étape intermédiaire du pilote unique. Bien que la probabilité que ce remplacement total survienne avant 2050 soit nulle, on peut percevoir cette tendance en filigrane dans la démarche du SPO (*Single Pilot Operation*).
Nous nous plierons donc à la tendance actuelle d'envisager d'abord le pilote unique **non sans analyse critique.**

Cette analyse nous amène à faire la synthèse des éléments mentionnés dans les chapitres précédents ce qui, pour la bonne compréhension de situations complexes, conduit parfois à répéter certains éléments en priant le lecteur de nous excuser.

Avant d'aller plus loin dans l'étude de ce « remplacement », comme déjà dit, il faut bien se rappeler que les pilotes ne sont pas uniquement des fauteurs d'accidents. Ils interviennent de façon permanente et positive sur les situations imprévues et/ou inattendues banales de tous les jours. Lorsque tout marche en accord avec les objectifs on oublie aisément grâce à quoi le résultat est positif, pour se concentrer sur ce qui ne va pas.

Notre démarche est de mener de façon logique notre analyse d'une diminution du nombre de pilotes à bord, aussi loin que possible en essayant de mettre en évidence les aspects positifs et négatifs. Partant du comportement des pilotes dans certaines circonstances et situations, comment un automatisme pourrait-il avantageusement remplacer le comportement humain ?

Il ne peut être question ici de comparaison avec un métro ou une voiture sur autoroute, ainsi que nous l'avons vu précédemment. En revanche les exigences basiques des vols d'avions de transports (sécurité, cohabitation dans le trafic, fiabilité, rentabilité, etc.) sont bien connues.

Noter aussi qu'aujourd'hui la communauté aéronautique reconnaît :

- **l'échec** d'utiliser les pilotes, et donc de les former, avec le simple objectif de conduire et de surveiller des automatismes censés tout faire,
- **la nécessité** de bien les instruire pour des interventions basiques, **avec ou sans automatisme**, en particulier face à des situations inattendues.

Enfin sur le plan quantitatif comme le rappelle la NASA, aujourd'hui il faut en moyenne 12 pilotes (6 équipages) pour l'exploitation d'un avion, **chiffre n'ayant pas varié depuis 30 ans**.

Evolution possible, prévisible, des automatismes

Etude "Autonomy Research for Civil Aviation : Toward a New Era of Flight", National Academy of Sciences américaine (2014)

C'est l'étude la plus complète sur le sujet existant à ce jour.
Elle s'applique à ce qu'elle qualifie de *« IA, Increasingly Autonomy »,* cousine de l'évolution vers notre « IA, Intelligence artificielle ».

Cette augmentation de l'autonomie dans l'aviation de transport est présentée **comme allant inéluctablement vers la mainmise totale des automatismes sur l'utilisation opérationnelle des avions**. L'évolution est tirée par l'attente d'importants bénéfices pour la sécurité, la fiabilité, l'efficacité, l'économie dans les systèmes, et par la possibilité d'avoir des capacités accrues dans les missions de transport aérien.
Cette IA des systèmes est caractérisée par leur capacité à conduire des tâches plus complexes avec moins d'interventions humaines pour de plus longues durées, parfois conduites à distance.

Les aspects de l'augmentation d'autonomie sont répertoriés de façon critique non sans admettre que des obstacles majeurs posent des questions très importantes, loin d'avoir des réponses. Par exemple comment intégrer ces évolutions technologiques dans le système actuel sans compromettre le taux de sécurité, ou comment faire admettre par tous des avancées n'offrant pas les mêmes perspectives pour chacun ?

Les problèmes de certification sont cités, en particulier ceux concernant l'autonomie faisant appel au choix intelligent, l'équivalence de l'intelligence artificielle forte ou du haut niveau d'intelligence. Comment pourra-t-on assurer que les systèmes faisant appel aux logiciels adaptatifs, non déterministes, vont augmenter la sécurité plutôt que la réduire ? Comment leur accorder une confiance meilleure que celle accordée à l'intervention humaine ?

De façon générale il faut assurer un interfaçage correct avec les humains censés les conduire ou les contrôler. Le rôle et les tâches de ces derniers sont à revoir totalement.

L'étude est optimiste et s'attache à ne laisser aucun coin d'ombre dans l'ensemble des points à traiter, notamment au travers d'un programme structuré d'activités de recherches, mais sans se risquer à estimer des délais quelconques, par prudence.
Elle ne se prononce pas sur la validité de l'élimination de l'Humain du bord de l'avion.

Diminution du nombre de pilotes à bord

Objectifs

Avant d'envisager le cas ultime de l'élimination de tout Humain opérationnel à bord il est prudent d'en conserver un sur les deux.
Suivant un principe de précaution cher à Guy Boy, si l'on pense pouvoir ne garder qu'un pilote à bord, il est préférable d'en ajouter un ; et si l'on pense n'avoir besoin d'aucun pilote à bord, il vaut mieux là-aussi en rajouter un !

Apparemment la raison de cette élimination partielle serait dictée par deux objectifs officiellement avancés : la réduction des coûts d'exploitation (NASA, UE) et la pénurie de pilotes face à l'augmentation du nombre d'avions prévus dans les prochaines années (NASA). Ces deux raisons semblent être intimement liées comme l'explique David Learmount[140] dans un article. Le bref résumé suivant montre l'intrication de facteurs à la fois indépendants et liés.

- La conduite automatique des missions a orienté en priorité la formation vers l'utilisation opérationnelle des automatismes. Les considérations financières ont amené, à durée constante des stages de formation, la réduction de l'enseignement des habiletés et connaissances de base au profit de celles dévolues à la conduite automatique. Les incidents et accidents des dernières années nécessitent de revoir les bases.
- Les aléas financiers mondiaux depuis l'attentat du 11/09/2001 ont conduit les compagnies à ne faire que des prévisions à court terme de recrutement des pilotes. Aux USA et ailleurs le recrutement d'anciens pilotes militaires s'amenuise alors que les besoins civils augmentent.
- L'attrait de la carrière de pilote de transport est certainement lié à la profession mais aussi à sa rémunération. Or celle-ci varie beaucoup entre les compagnies traditionnelles et celles à bas coûts, entre les lieux géographiques, entre les bases requises de formation. Bien sûr les licences imposent des minimas de formation, mais interprétés par chacun.
- Le coût de la formation ab initio est souvent laissé à l'initiative du candidat pilote. L'imposition par la FAA de 1500 heures de vol minimum pour une licence ne va pas dans le sens d'une augmentation des candidatures.
- L'OACI essaie de mettre de l'ordre dans cette situation chaotique sans vraiment convaincre l'ensemble des acteurs payants.

Le résultat est une pénurie de recrutement pour certains (par exemple aux USA) mais aussi une apparente absence de problème pour d'autres (par exemple dans le Golfe).
Donc aucune de ces deux hypothèses, coût et pénurie, ne repose sur des prévisions quantifiées alors que leur faiblesse, due comme déjà vu au court terme des prévisions financières, pourrait être démontrée.

Une autre hypothèse peut être avancée : l'impossibilité des humains à réfréner l'idée de la toute-puissance de leurs connaissances, hier avec l'idée que la science pourvoirait à tout, aujourd'hui avec celle qu'ils pourraient assurer un jour leur propre remplacement, partiel ou total.
Et bien évidemment se place en filigrane le fait que l'augmentation des prothèses à bord a diminué le taux d'accidents, ce qui est vrai. Mais répétons-le avec des aéronefs à deux membres d'équipage, ce qu'on a tendance à oublier.
Des études étant aujourd'hui officiellement financées sur le SPO (*Single Pilot Operation*) il apparait nécessaire d'examiner ce cas sous ses trois volets principaux de faisabilité :

- Tâches assignées à l'Humain rescapé
- Conséquences opérationnelles et économiques
- Fiabilité du système mis en place.

[140] David Learmount 15/03/2015

Compte tenu de ce qui précède on peut avancer que toute diminution de l'équipage de conduite à bord est soumise à plusieurs facteurs concomitants :

- le respect d'un taux de sécurité au moins égal à l'actuel (celui d'Amérique du Nord et de l'Europe), semblant implicitement admis par tous les acteurs, alors que celui projeté pour 2050 devrait être amélioré d'un facteur 2 ;
- la compatibilité avec l'évolution de l'organisation mondiale du transport aérien (ATM, équipements, communications) ;
- l'exigence de rentabilité des compagnies (investissements, *retrofits*, coûts d'exploitation) ;
- la fiabilité des solutions **et leur certification**.

Quelle que soit la valeur des arguments avancés, pour ou contre cette diminution, il y a une tendance irrépressible vers la diminution du nombre de pilotes à bord, voire leur suppression. Il faut clairement poser la question, peut-être politiquement incorrecte : cette diminution est-elle financièrement bénéfique ou acceptable **pour l'ensemble du système de transport aérien** si l'on tient compte de la totalité des contraintes, par exemple augmentation et complication exponentielle des automatismes d'autonomie, « *retrofits* » obligatoires, aide du sol et communications, protections supplémentaires, organisation adéquate des supports sol (humains et matériels), formation spécifiques des nouveaux intervenants, etc. ?

Aujourd'hui, sans calcul précis il est permis de douter que la diminution de l'équipage à bord puisse être financièrement attractive alors qu'elle est présentée sous le prétexte d'économies majeures, doublé de l'étonnante crainte de ne pas avoir suffisamment de pilotes disponibles à relativement court terme masquant la véritable raison qui semble être plutôt la réticence des acteurs, surtout des compagnies aériennes, à investir à moyen et long termes dans la sélection, la formation et le recrutement des futurs pilote, leurs préoccupations financières restant soumises au court terme. On préfère s'en remettre à la toute puissante technologie dont les effets s'inscrivent objectivement dans la durée plutôt que de prendre le risque d'avoir éventuellement plus tard d'encombrants et onéreux surplus de pilotes.
Cependant le calcul du bilan financier provenant de la diminution du nombre de pilotes à bord a toutes chances d'être faussé par la fragmentation des intérêts a priori pas forcément convergents des nombreux acteurs en cause, industriels, compagnies, contrôle au sol, autorités de certification, Etats, etc., chacun défendant ses intérêts propres, avec la publicité claironnante des médias.

Un problème potentiel peut être déduit des constats avérés de David Learmount déjà cité. Si les conditions motivant les candidats à la profession restent à un niveau réduit, ou diminuent, en particulier le salaire tiré vers le bas pour des raisons d'économie, il est évident qu'il y aura une difficulté de recrutement au niveau mondial, ce qui laisse entrevoir des sélections pas trop regardantes au regard de la pression de la nécessité. Cela irait dans le sens d'une diminution statistique du professionnalisme, donc de l'augmentation du risque humain. Avec en conséquence le désir conforté de s'affranchir de l'Humain dérangeant.

Un autre problème sérieux que nous verrons plus loin pour l'équipage monopilote est l'acquisition de l'expérience afin d'exercer **la fonction de CDB qui, d'emblée, est celle du seul pilote à bord**. On peut craindre un certain laxisme sur cette acquisition, causé là-aussi par la pression de la nécessité.
Ces deux exemples montrent la prudence de choix de solutions dictées par des considérations principalement économiques.

Caractéristiques de mission à prendre en compte

Dans ce qui suit la base de l'analyse est l'estimation de ce que doivent faire les automatismes/prothèses pour remplacer l'Humain à bord.

Une mission de transport aérien comporte de multiples aspects que nous ne pouvons pas ici développer dans leur ensemble. Pour simplifier nous choisirons dans notre démarche le cas enveloppe des tâches

conduisant à la probabilité maximale d'aléas dangereux, la conduite de la trajectoire, et nous nous limiterons à cette conduite.
Remplacer le pilote dans cette tâche, même si elle est déjà largement automatisée, impose la connaissance de ses mécanismes cérébraux lorsqu'il doit intervenir. Donc celle des savoir, savoir-faire et savoir-être opérationnels accumulés dans ses mémoires, c'est-à-dire les habiletés, les règles, procédures, et les connaissances qui y sont stockées. De façon pratique il s'agit de l'application des analyses bien connues des *S R K (Skills, Rules, Knowledge)*.
Leur base hautement technique impose un minimum de connaissance opérationnelle à ceux désirant remplacer le comportement cognitif des pilotes, qui est une adaptation permanente aux combinaisons de tâches techniques nécessaires au vol. Sans une compréhension suffisante de ces tâches la validité des hypothèses sur le comportement serait illusoire.

De façon classique on considère trois types de gestion du vol : à court terme dans l'immédiat, à moyen terme de façon tactique, et à long terme de façon stratégique.
Ici aussi nous allons simplifier en ne considérant que le court terme car l'analyse des accidents et incidents graves montre l'importance primordiale de la résolution à court terme de situations potentiellement dangereuses, en particulier celles comportant l'inattendu. Cependant le moyen terme et le long terme ont une influence directe sur ce court terme, en le conditionnant par leur apport au contexte d'une situation.

La mission évolue simultanément dans plusieurs systèmes physiques ayant chacun leur prise en compte cognitive particulière par le pilote. La pratique du pilotage a enseigné le traitement en cohabitation indifférenciée de ces différents systèmes, qui cependant à très court terme, celui qui nous intéresse, sont traités cognitivement de façon séparée.
Ainsi la conduite du vol par le pilote concerne 7 systèmes différents[141], totalement interconnectés mais ayant chacun sa logique propre :

- L'avion en tant que mobile dans l'air
- La propulsion de l'avion
- L'espace mobile environnant, l'atmosphère
- L'espace fixe géographique, obstacles, aéroports
- Les autres mobiles et leur régulation, l'ATM
- L'avion « interne », ses systèmes, la présence humaine, passagers et équipage
- L'environnement commercial, le centre opérationnel compagnie

Le pilote doit « intégrer » les particularités de ces 7 systèmes et les utiliser dans le présent comme un tout, d'où la difficulté de l'exécution de la mission, disons du pilotage d'un avion. Cette intégration permanente et très dynamique constitue une particularité essentielle de la compétence du pilote.
Pour la conduite de la trajectoire, cette intégration peut être assurée en grande partie sans problème majeur par des automatismes. L'ensemble « commandes de vol + pilote automatique + FMS » le fait déjà en grande partie. Cependant, une autonomie totale implique une augmentation de complexité dans l'agencement temporel des séquencements d'interventions, dans les communications sol-bord, et surtout dans la capacité d'intervention face à l'inattendu.
La partie la plus aisée est la combinaison des 4 premiers systèmes se présentant de façon physiquement simple : essentiellement au travers des équations de la mécanique du vol.
Les variables en cause ne sont pas toutes indépendantes et, en situation dynamique et rapidement évolutive, certains transferts peuvent être complexes entre leurs valeurs instantanées, leur relativité et leurs influences.

Pour le pilote son problème essentiel est multiple :
- connaître à chaque instant sa trajectoire et sa position par rapport à l'espace environnant, en distance et en position angulaire,

[141] Id° 117

- contrôler cette trajectoire et vérifier qu'elle est conforme aux prévisions ou aux intentions,
- connaître ses marges par rapport aux limitations diverses,
- planifier et contrôler sa phase de vol,
- faire face à tout imprévu.

Cela se traduit par l'obligation d'une connaissance exacte de la situation (par exemple par rapport aux exigences de la phase de vol, de l'environnement, des limitations du domaine de vol), donc de la meilleure conscience de situation possible. **Le remplacement du pilote exige toujours pour l'ensemble des deux super-agents déjà définis (à bord et au sol) d'avoir en permanence la possibilité d'obtenir cette connaissance immédiate exacte de la situation présente.**

Répertoire des situations et des fonctions à assurer

Le premier travail est pour chacune des missions l'établissement de **la liste des situations et combinaisons de situations imaginables associées à leur probabilité d'occurrence**, exercice déjà connu pour les systèmes actuels mais d'amplitude plus étendue pour l'autonomie avec l'obligation de rechercher, d'imaginer, les nombreuses combinaisons possibles de situations. Ensuite vient le tri des fonctions à assurer pour mener et gérer la mission, en leur attribuant de façon classique un taux d'occurrence probabiliste et un niveau de sécurité en situation normale ou anormale, sans ou avec pannes. Ceci inclut les fonctions en coopération avec les correspondants au sol, ATM et centres des compagnies.

Ce travail considérable est déjà fait en grande partie pour la certification classique d'un avion. Pour tout avion et ses systèmes, et pour chaque fonction associée à ces systèmes, une analyse approfondie et statistique des répercussions opérationnelles est ainsi effectuée, dans des combinaisons d'utilisation (normale ou avec pannes estimées) et de situations de vol (elles-aussi normales ou anormales et probables), définies pour la mission de l'avion. L'expérience des pilotes est prise en compte en y ajoutant un coefficient de sécurité. La combinaison de la totalité des systèmes débouche sur des probabilités d'occurrence de situations potentiellement dangereuses et le choix des solutions techniques permettant une certification acceptable de l'avion en pilotage manuel ou automatique.

Noter qu'il s'agit de l'imaginable, avec un doute sur son estimation, et sur la quantification possible d'un imaginable non expérimenté.

Beaucoup de ces fonctions sont déjà prises en compte par les automatismes/prothèses actuels ou prévus. L'important pour la sécurité est le traitement d'aléas inattendus ou imprévus. Ici aussi une partie est déjà traitée ou en voie de traitement (GCAS, TCAS par exemple). Mais tout ne l'est pas ou ne peut pas l'être.

Un seul pilote à bord

Nous allons faire pour ce cas précis la synthèse des éléments s'y rapportant en combinant trois aspects principaux :

- le partage des tâches avec les automatismes/prothèses,
- la nécessaire assistance hors automatismes,
- l'interfaçage pilotes-automatismes (bord et sol).

Une remarque : pour les vols long courrier il faudra un ou deux pilotes supplémentaires à bord pour des raisons de fatigue, pas forcément ensemble dans le cockpit, mais pas forcément aussi en dehors.

Partage des tâches

La première idée est de recenser l'ensemble des tâches et procédures nécessitant aujourd'hui deux pilotes à bord afin d'éliminer celles assignées à un pilote devenant inutile, par exemple au PNF copilote et en les confiant à des prothèses ad hoc. Ce type d'analyse est évoqué précédemment dans le chapitre « Répertoire des situations possibles et des fonctions nécessaires ». Cette analyse contient aussi l'examen des tâches restant dévolues à celui encore en place, le PF commandant de bord, si possible en les simplifiant ou en les confiant à d'autres prothèses.

Pour être concret, lorsqu'on voit les centaines de procédures normales, anormales, d'urgence complétées par celles des SOP (*Standard Operating Procedures*), avec toutes leurs combinaisons prévisibles, on peut penser que les bureaux d'études mettront quelque temps à définir l'ensemble des dites prothèses avec leur fiabilité matérielle correcte, soumises ensuite aux autorités de certification.

Mais supposons que nos ingénieurs réussissent à atteindre une autonomie idéale pour l'avion, prenant en compte dans sa totalité la conduite de la trajectoire du terminal de départ à celui d'arrivée ainsi que la gestion de l'ensemble des systèmes, cela évidemment grâce à des calculs sophistiqués de probabilités d'occurrence de combinaisons de pannes des systèmes et de situations opérationnelles normales, d'urgence ou anormales prévisibles. Il restera à traiter les situations inattendues voire imprévues comme évoqué dans le cas d'un remplacement total du pilote.

Protection et sauvegarde

Avant d'aborder l'autonomie il semble nécessaire de parler des protections à assurer.
Aujourd'hui les avions sont équipés de protections permettant de détecter les limites des domaines de vol ou de fonctionnement des systèmes (alarmes visuelles, auditives, tactiles), ou même empêchant le franchissement de ces limites (par ex. automatismes d'interdiction de franchissement de limites du facteur de charge en évitement d'obstacle).
Ces protections, automatiques ou non, sont adaptées à l'action et au contrôle par des pilotes à bord.
Ici une remarque s'impose. Pour le domaine de vol, et pour le domaine de fonctionnement de nombreux systèmes, elles fonctionnent au franchissement du domaine périphérique, précédant et protégeant le franchissement du domaine interdit, et permettant au pilote de revenir sans mal dans le domaine normal. Cette notion de protection par un domaine périphérique n'existe pas pour l'Humain, pour le pilote, ainsi que l'a implicitement souligné le chapitre sur la fiabilité du pilote. Est-ce vraiment impossible de ne pas envisager un **domaine de comportement périphérique** dans toute adaptation humaine, comme marge de sécurité ?

Dans ce qui suit, au-delà des protections classiques, avec l'autonomie nous allons voir la nécessité de véritables phases de vol automatisées extrayant l'avion de situations dangereuses ou létales, suivies ou non de reprise en main pour la poursuite du vol. Nous les qualifierons d'« actions de sauvegarde ».

Autonomie

D'après ce qui précède un seul pilote à bord signifie qu'il devient à la fois le CDB et l'unique PF, les actions assumées par un éventuel PNF étant prises en compte par l'autonomie.
Cette autonomie n'est acquise qu'au prix de l'augmentation de la complexité des logiciels adaptés aux situations de vol, aux pannes, à la prise en compte du grand nombre de leurs combinaisons. Il est relativement aisé de définir des missions nominales sur des parcours définis, bien que le nombre de cas à traiter puisse donner le vertige, et on peut penser que ce sera possible dans un avenir assez proche, 20 ou 30 ans peut-être.

Mais être capable de traiter de façon systématique tous les aléas banals et néanmoins potentiellement dangereux du vol reste problématique compte tenu de l'exigence de sécurité. Cela restera donc encore du ressort humain, de l'unique PF. Evidemment une partie de ces aléas peut s'évanouir dans de savants calculs de probabilité d'occurrence des situations sauf que, quoi qu'on fasse, il y aura toujours une part d'imprévisible que ne pourront pas traiter les logiciels forcément déterministes car élaborés par d'autres humains.
Les accidents de ces dernières années montrent la résurgence de cas éliminés par leur classification d'occurrence improbable, et/ou parce que du fait de cette très faible probabilité on les a solutionnés grâce à des procédures enseignées aux pilotes, en oubliant **qu'ils sont d'autant moins préparés à y faire face que l'occurrence de ces cas est faible**.

Une remarque préliminaire. La fiabilité des matériels (*hardware*) est devenue remarquable et la capacité des mémoires ne cesse d'augmenter**. Le souci vient de la complexité croissante des logiciels, de leur**

maîtrise dans leurs combinaisons multiples, de leur vérification, de leur contrôle. Et aussi de la difficulté à estimer les probabilités de risque dans ces combinaisons.

Pour traiter l'autonomie nous reprenons les concepts cités plus haut dans le chapitre « Des prothèses ». Nous revenons aux classifications américaines citées, et dans le cas envisagé ici du pilote unique il est probable que l'autonomie ne concernera que les fonctions de « bas niveau » évoquées pour les drones, au moins au début.

Alors que deviennent les fonctions de « haut niveau » ? On peut en définir d'emblée trois catégories principales : la modification de la mission, la reprise du contrôle direct de trajectoire et le traitement de situations inattendues ou imprévues dangereuses.

- La modification de la mission ne demande ni des commandes d'automatismes exceptionnelles ni des qualités humaines exceptionnelles.
- La reprise du contrôle en vol de la trajectoire peut être facilitée ainsi que nous l'avons vu dans la 1ère partie par la redéfinition des tâches des pilotes et de leurs prothèses, que ce soit en équipage à deux ou avec le pilote unique. **Il y aura toujours des situations nécessitant une telle reprise de contrôle**, atterrissage sur les terrains insuffisamment équipés, situations météo anormales, etc. Mais ici se situe le risque évoqué de l' « effet falaise » (voir chapitre « Le directeur de vol, le pilotage par fonctions »).
- La troisième catégorie, celle des choix et décisions en situations critiques se détériorant rapidement, pose un problème comme vu précédemment dans « Le court terme dangereux ».

Les fonctions d'enchaînement de perception, de choix de solution et de décision dans des situations ouvertes c'est-à-dire subissant des contraintes extérieures, exigeant le traitement rapide d'incertitudes pour adopter une solution de détresse, sont encore et pour longtemps l'apanage des humains, jusqu'à l'apparition d'ordinateurs fiables ayant une flexibilité de traitement cognitif équivalents à celle de notre cerveau humain. Leur évolution réelle vers ce type de fonctionnement reste encore problématique et il est impossible d'en faire un pronostic, sauf à penser qu'il sera peut-être possible pour des fonctions limitées (définies de façon déterministe).
Pour ces ordinateurs, ces systèmes, il s'agirait pour toute situation reconnue se présentant, y compris les inattendues imprévues, de confronter les paramètres de la situation à un éventail de solutions possibles dans le contexte présent, associée chacune à une probabilité choisie de succès, à les comparer, les combiner, pour retenir la plus probable et obtenir la meilleure sortie en termes de sécurité, de risque acceptable. Pour cela il faudrait tirer des mémoires stockées les parties les mieux adaptables à la situation et à son contexte afin de construire ces solutions, et simuler pour chacune d'elle l'aboutissement statistique de son application.
Et si aucune des parties extraites n'arrivait à satisfaire l'objectif de sécurité, l'ordinateur devrait être capable d'en inventer immédiatement.

Il est évident qu'on ne peut pas traiter d'emblée tous les cas imaginables, mais **répertorier l'ensemble des situations inattendues, banales, corrigées aujourd'hui par les pilotes** serait possible en les associant à des objectifs de sécurité, cependant sans pouvoir aller vers la quasi infinité de celles imprévisibles, inconnues par définition. Les autorités garantes du niveau acceptable de sécurité vont avoir fort à faire de par leur rôle de filtre.

Faisons une incursion dans le contrôle de trafic aérien qu'il ne faut pas oublier. Son évolution reste toujours très lente vers une automatisation des tâches et des liaisons sol-air. On s'oriente évidemment vers des transmissions interactives automatiques avec l'avion. Cependant le pilote reste responsable de l'acceptation des propositions du sol. En revanche les ordres d'évitement d'obstacles, au sol ou en l'air, deviendront automatiques suivant des standards de procédures mondiaux. Là l'automatisme des fonctions de bas niveau sera la règle, laissant celles de haut niveau sous la responsabilité des pilotes. Cela signifie que pour longtemps l'avancement de l'automatisation du trafic aérien n'aura pas plus

d'influence dans le cockpit que l'avancement des modifications des tâches de conduite de trajectoire ou de celle des systèmes de l'avion.
Quelles que soient les libertés accordées dans le choix des trajets, ces libertés seront forcément régentées par l'obligation de la sécurité de cohabitation dans un volume aérien ainsi qu'au départ et à l'arrivée. L'autonomie y pourvoira en grande partie.

Reste à définir les partages de responsabilité entre sol et bord, surtout dans le cas de gestion des trajectoires des avions à partir du sol, ainsi que les procédures de transition de reprise en main depuis le sol ou en vol.

De tout cela on peut déduire une conséquence embarrassante. Si le retrait de pilotes du cockpit est surtout dicté par une raison économique, lorsque l'autonomie opérationnelle deviendra la règle les pilotes n'auront plus à s'occuper des fonctions de bas niveau, sauf éventuellement avec la difficulté des reprises soudaines en urgence et en manuel. En revanche **ils devront assurer les fonctions de haut niveau nécessitant une sélection, une éducation et une formation elles-aussi de haut niveau**, d'autant plus que la réaction demandée en cas de nécessité devra être immédiate alors que l'autonomie des bas niveaux rendra le vol tranquille sinon monotone. Cela rendra le rôle des pilotes d'autant plus critique et les pilotes un peu plus chers en sélection et formation !

L'assistance à l'unique pilote

D'après l'ensemble de ce qui précède, avec l'hypothèse que l'autonomie fonctionne comme indiqué ci-dessus, nous pouvons voir qu'une aide reste nécessaire dans les cas suivants :

a. incapacité totale ou temporaire du pilote
b. situations à forte charge de travail
c. situations dangereuses à évolution rapide
d. monitoring
e. perte de vigilance
f. action personnelle dangereuse ou acte terroriste.

A titre d'information l'article de AW&ST de janvier 2015 « NASA Advanced Single-Pilot Operations Concepts » donne des indications sur l'évolution des recherches aux USA. Cependant le contenu de cet article est loin de couvrir les 6 aspects de l'assistance nécessaire. Plus important : sous réserve d'une analyse poussée des études de la NASA, **il apparait douteux qu'on puisse vraiment aider le pilote dans des cas difficiles**, ce qui mettrait en cause le concept du pilote seul à bord.

A l'aide de cas concrets nous allons essayer d'examiner comment on pourrait dans un futur proche exercer pour les 6 cas une réelle l'assistance à un seul pilote à bord. Le nombre de situations analysées est limité et les extrapolations de possibilités sont hypothétiques, mais l'analyse donne des indications intéressantes, voire préoccupantes.

a - Incapacité totale ou temporaire du CDB

Ce cas, traité dans le Livret 5, est probablement le plus aisé à considérer. Les références sont nombreuses et toutes ont été solutionnées par l'intervention du 2ème membre de l'équipage. Comment le solutionner avec le pilote unique ?

Le temps disponible étant le paramètre-clé, mais a priori inconnu, deux problèmes sont à résoudre :
- la détection et l'identification de la défaillance afin de lancer l'action corrective
- le moment et le type d'intervention correctrice.

D'abord la déficience doit être perçue et reconnue, ce qui impose un système de détection fiable à trouver. Entre autres la surveillance des variations de dimension des pupilles de l'œil pourrait peut-être donner une solution.
Le problème étant détecté une alarme est déclenchée pour une intervention venant du bord ou du sol.

Dans ces séquences il faut du temps pour intervenir.

A bord au moins une personne doit avoir les compétences pour le faire (le personnel de cabine ne les possède pas aujourd'hui) avec la possibilité de se déplacer malgré les mouvements de l'avion et les obstacles internes (phase de vol, éventuelle action non intentionnelle du pilote déficient sur des commandes de vol, turbulence, cabine encombrée). Un accès suffisant aux moyens de sauvegarde est à prévoir dans le cockpit ou ailleurs.
Au sol le problème n'est pas moins compliqué avec les délais de communications, le temps pour l'assistant au sol de saisir les données pertinentes à sa disposition, celui de comprendre la situation et d'agir sur l'avion. C'est-à-dire le plus souvent au-delà de 10 min.
Dans les deux cas le recours à l'autonomie de l'avion est nécessaire pour préserver le délai d'intervention. Donc il faut qu'en plus de l'alarme la déficience elle-même déclenche une récupération automatique préalable de la situation, avec éventuellement déroutement automatique vers un terrain utilisable, laissant le temps à l'assistant de s'installer pour une intervention éventuelle. Cependant le temps disponible dépend de la phase de vol et de l'évolution de la trajectoire au moment de la défaillance.

Ainsi pendant :
- *la course de décollage*, avant V1, un arrêt automatique sur la piste est nécessaire ; après V1, il faut un décollage automatique ;
- *la montée initiale*, l'autonomie assure la poursuite automatique du vol suivant le plan de vol ;
- *l'approche finale*, une remise de gaz automatique est nécessaire.

Et dans ces mêmes phases de vol et afin de poursuivre le vol il y a obligation d'avoir rapidement une personne dans le cockpit ou au sol, ayant l'accès direct et immédiat aux paramètres de vol et aux commandes de sauvegarde.
Le cas le plus favorable est la défaillance sans action intempestive involontaire dans une phase de durée d'au moins plusieurs minutes, par exemple en croisière.

Comme le montre le Livret 5, le calcul des risques associés à chaque solution peut être mené en fonction des temps de durée estimée des phases de vol dans lesquelles la déficience pourrait se produire.
Cependant on peut relever les problèmes majeurs à résoudre :
- la détection fiable de la déficience physiologique
- l'autonomie nécessaire de l'avion, fonction de la situation réelle et de son environnement, avec son niveau exigé de fiabilité
- la reprise en main pour la poursuite du vol
- l'agencement à bord ou au sol des postes et des interfaces de sauvegarde
- la sélection, la formation et l'entretien de la compétence des personnels d'intervention.

Indépendamment des cas délicats mentionnés, il y a aussi l'incapacité temporaire du pilote unique lorsqu'il quitte le poste pour satisfaire à un besoin naturel ou pour se dégourdir les jambes. Mais en général le moment peut être choisi en limitant les problèmes potentiels.

b - Situations à forte charge de travail

Dans son ensemble l'autonomie doit diminuer fortement la charge de travail du pilote. Nous avons vu comment parvenir à déceler ce qu'il convient de lui garder comme tâches (chapitres « Caractéristiques de mission à prendre en compte » et « Répertoire des situations et des fonctions à assurer »). Malgré tout il est hautement probable que dans sa mission comportant les 7 systèmes mentionnés il y aura des périodes de saturation mentale.
On peut supposer que dans ce cas l'aide serait demandée par le pilote, ou qu'elle puisse éventuellement être imposée du sol.
Dans les cas de décollage et d'atterrissage l'assistance à bord ou au sol ne peut venir que d'un opérationnel ayant la compétence minimale d'un copilote qualifié sur le type d'avion concerné, ayant à sa disposition en temps réel toutes les informations et commandes pertinentes ainsi qu'un contact visuel (video) et/ou vocal avec le pilote.

Ici se pose le problème non seulement du partage des tâches mais surtout celui des responsabilités de décision, d'interruption du décollage et de remise de gaz à l'atterrissage par exemple. L'automaticité de ces phases de vol a été évoquée précédemment mais la reprise manuelle par le pilote doit toujours être possible.
Par exemple comment déceler du sol sans erreur l'irruption d'un vol d'oiseaux, ou comment interpréter un bruit, éclatement d'un pneu, rupture de structure ? Alors de quelle assistance peut-il s'agir ? D'un simple monitoring ?
Le problème est plus aisé dans les phases de vol où le délai acceptable d'obtention d'assistance peut atteindre plusieurs minutes, 10 à 15 minutes au minimum pour que le « copilote » soit disponible physiquement **et mentalement**. Il faut encore définir ici les informations et commandes à transmettre.

c - Situations dangereuses à évolution rapide

Ce cas est dimensionnant.
L'idée de résoudre les éventuels problèmes sans aide extérieure est intéressante car on s'affranchit de nombreuses contraintes, et pour un constructeur ou un exploitant les solutions ne dépendent alors que de lui pour l'essentiel. A savoir la mise en œuvre de l'autonomie maximale de l'avion ainsi que définie précédemment, donc avec des solutions innovantes et fiables, malgré l'augmentation de la complexité liée aux nouveaux capteurs, aux nouvelles fonctions de pilotage et de conduite, à la multiplicité des interconnexions.

Prenons le cas du vol AF447. Supposons que ce cas de givrage des sondes survienne avec un seul pilote à bord. Sans vouloir se substituer à l'avionneur, qui a depuis réagi dans le bon sens, on peut réfléchir sur ce qu'il conviendrait de faire pour éviter une divergence catastrophique.
On peut multiplier le nombre de sondes de pressions et diversifier leur localisation, **diminuant ainsi la probabilité de n'en avoir aucune d'utilisable**, mais on ne peut éviter une possibilité de givrage simultané éventuel.
Le véritable problème est celui de la reprise manuelle, toujours délicate en cas d'interruption brutale de l'aide des automatismes de pilotage. Il faut éviter la suppression des protections dans une situation dégradée où elles sont le plus utiles, ainsi que la discontinuité de situation entraînant l'obligation d'une soudaine reprise inattendue.
Une solution évitant une obligatoire reprise instantanée, faisant appel à l'autonomie, consisterait à garder le pilotage par les automatismes malgré les sondes givrées, passant automatiquement sur un mode de sauvegarde géré par d'autres sources qu'aérodynamiques, inertielles par exemple, pendant une durée permettant une prise consciente de la situation par le pilote, et/ou le dégivrage effectif des sondes.

Au-delà de ce cas, l'autonomie devrait permettre d'éviter la divergence de certaines situations à évolution rapide et à risque élevé, par exemple la mise en œuvre automatique des systèmes de dégivrage à l'approche d'une zone givrante, ou la rentrée automatique des becs et volets en remise de gaz.

L'assistance au pilote solitaire est-elle possible dans ces cas de divergence rapide potentielle ? La transmission d'une alarme, commandée ou automatique vers le sol est envisageable, mais la prise en compte par une sauvegarde autonome ne sera jamais garantie en toutes situations, et l'aide venant du sol ne sera jamais immédiate en toutes circonstances, compte-tenu des délais de communication, de l'obligation d'avoir quasi-instantanément (en quelques secondes) l'idée correcte de la situation, et d'avoir à sa disposition les commandes de la sauvegarde appropriée pour le type d'avion et l'environnement concernés.
Comme nous l'avons vu la seule assistance possible est celle d'un équivalent du copilote à bord, comme traité dans le cas d'incapacité, certainement pas celle d'une personne issue du personnel de cabine.
Il faut donc calculer la probabilité du risque associé.

En-deçà de cette difficulté (impossibilité ?) d'assistance il existe la possibilité « d'armer » mentalement le pilote pour faire face efficacement à l'imprévu dangereux. D'abord en sélectionnant les pilotes avec le critère de résistance au stress et de la maîtrise de soi et ensuite en l'éduquant aux réactions appropriées

face à l'inattendu. Evidemment même si qualitativement on a la certitude d'une amélioration des comportements opérationnels, on n'aura jamais celle d'une fiabilité totale.

d - Monitoring

On suppose ici que le monitoring, la surveillance des situations, des fonctions, des paramètres, puisse se faire de façon automatique et fiable. Nous venons de voir, sans y revenir, que cette surveillance dépend de la phase de vol et de la situation. Sa qualité est fonction de la fréquence et de la durée des créneaux d'observation, de la fiabilité des systèmes automatiques de surveillance, et de la compétence de l'observateur. Il s'agit là de la mise en place d'un véritable système couvrant le réseau de chaque compagnie aérienne, d'une extension de leurs centres de contrôle opérationnel, avec des personnels de qualifications différentes et des procédures de transferts de suivi des avions. Assurant une assistance soit lâche en situation nominale, soit au contraire immédiate par un « pilote » qualifié en situation critique.

e - Perte de vigilance

Ce cas a été traité dans le chapitre « La vigilance – L'éveil ». Il est équivalent à celui d'une incapacité temporaire. Les moyens à y consacrer sont les mêmes.
Un vol assisté d'automatismes assurant une autonomie avancée ne donne pas beaucoup d'information au pilote solitaire installé dans le confort, surtout dans les longues périodes de croisière. Dans les cas d'absence d'informations sur lesquelles l'attention peut s'accrocher celle-ci dérive vers autre chose, voire vers le sommeil. On sait que la vigilance est directement associée au maintien d'activité hors monitoring. Le problème réside en la possibilité de conserver un minimum permanent d'action consciente dans le cockpit, liée à la mission.
Sans intervention appropriée venant de l'intérieur de l'avion ou de l'extérieur, encore à trouver et définir, la perte de vigilance peut poser un risque sérieux pour l'équipage à un seul pilote, par exemple dans les vols de durée supérieure à 1 heure ½. Des données existent sur ce problème traité depuis 40 ans et des moyens automatiques ou semi-automatiques de surveillance de la vigilance ou de « réveil » peuvent (doivent ?) être envisagés.
Pour ces vols de longue durée plusieurs pilotes se succéderaient dans le cockpit.

f - Action personnelle dangereuse ou acte terroriste

Une défense contre un acte personnel dangereux du pilote ne semble pas efficacement possible par recours à l'assistance d'un personnel de cabine. De toute façon la présence permanente d'une tierce personne dans le cockpit ne garantit pas cette défense à 100%.
Des informations manquent sur d'éventuels actes désespérés ou malveillants d'un pilote ayant été contrecarrés grâce à une intervention interne à l'avion. Elles existent certainement dans le monceau de comptes rendus d'incidents enregistrés depuis 30 ans. Elles pourraient donner des informations chiffrées sur ce type de menace.

Avec un seul pilote à bord, il sera difficile de détecter suffisamment tôt un acte de ce genre, de le différencier par exemple d'une éventuelle descente d'urgence, ou de la nécessité immédiate de quitter son niveau de vol, associées à un problème de communication dû aux circonstances opérationnelles. L'ATC, nous l'avons vu, peut faire cette détection mais avec un délai incompatible avec une récupération, surtout si la descente est initiée près du sol.
En supposant que la détection ait bien fonctionné, la seule décision possible, venant du bord ou du sol, est de rendre l'avion immédiatement autonome, soit pour le dérouter vers un terrain disponible et y atterrir, soit pour en prendre le contrôle du sol sans possibilité d'intervention à bord. Cependant il est assez facile d'agir du bord de façon malveillante sur des actions vitales, sauf si l'ensemble des systèmes et de leurs liaisons ne peut être contrôlé que du sol, en les isolant du cockpit et de la cabine.
La fiabilité d'une telle solution de sauvegarde peut s'avérer faible, mais de toute façon les passagers sont en survie, ce qui peut rendre acceptable une fiabilité réduite.

Contre le terrorisme, la solution du déroutement automatique vers un terrain utilisable, sans possibilité d'action interne ainsi que déjà dit, semble être une solution. Il reste à savoir où et comment la situation est détectée, et qui lance la sauvegarde.
L'intervention de l'ATC semble obligatoire quelque part dans cette phase critique.

Remarques sur l'assistance à bord

On peut évidemment tout imaginer mais combiner des fonctions aussi différentes que la gestion commerciale et de sécurité de la cabine et la conduite en état de panne ou de détresse de l'avion, oblige à réfléchir sur les tâches réelles assignées à la personne désignée, à sa faculté de se rendre rapidement au poste de pilotage en situation de crise (mouvements de l'avion, turbulence, fumée, obstacles inattendus), à sa capacité à prendre conscience de la situation, à réagir dans ces conditions, à sa formation duale, au risque ainsi accepté.
Mais comme on l'a vu précédemment, l'aide interne (ou externe) n'est pas envisageable de façon immédiate comme nécessaire dans une situation imprévue ou inattendue dangereuse à évolution rapide.

Il faudrait qu'il y ait un assistant à chaque vol, qu'il ait reçu une formation adéquate, qui même limitée aux cas d'urgence ne peut pas être « une simple pression de bouton », tenant compte de la rareté d'une possible intervention et de l'état de surprise face à l'évènement, donc avec recyclage périodique pour l'ensemble des préposés à l'assistance.
L'assistance dans les périodes de forte charge de travail nécessiterait une compétence minimale s'apparentant à celle d'un PNF.
A quel coût ?

Remarques sur l'assistance externe

Elle a été traitée précédemment, mais la solution donnée dans l'étude NASA citée mérite quelques commentaires additionnels.

Il y aurait un seul pilote à bord, garant de la sécurité immédiate, et un second au sol. Ce dernier pourrait assurer le monitoring de plusieurs avions lorsqu'ils sont dans leur fonctionnement nominal, sans panne ni aléa majeur, par exemple en croisière. La NASA cite la possibilité de traiter ainsi 12 avions par une seule personne. En revanche en cas de fonctionnement non nominal le pilote au sol devrait se consacrer au suivi du seul avion critique pour aider le pilote à bord, en confiant à quelqu'un d'autre la surveillance des autres avions. Sa qualification technique doit lui permettre d'intervenir dans les problèmes d'autonomie et de gestion des aléas. Ce serait une extension des centres d'exploitation des compagnies aériennes. Devrait-il avoir une qualification de copilote ? C'est probable. Mais pour quels types d'avions, la totalité de ceux de la compagnie ? L'opinion des pilotes participant à l'étude NASA est claire sur le sujet : **« I need someone on dedicated support that has been where I've been, that can feel what I feel and know what the issues are ».**
Ce sérieux problème de qualification est à traiter avec soin. Une telle solution permettrait d'avoir un support opérationnel technique immédiat, à condition d'être bien organisé. A quel coût ?

Cette solution du pilote au sol garant de la sécurité immédiate peut être considérée autrement, le pilote réel étant au sol et celui à bord n'étant que son assistant. Dans ce cas le pilote au sol doit avoir à sa disposition immédiate toutes les informations nécessaires au vol et son action ne peut pas se limiter à un seul monitoring. Peut-il se consacrer à plusieurs avions simultanément ? Qui serait le pilote responsable du vol, en particulier pour les passagers ?

La transmission de l'ensemble des paramètres de vol vers le sol est obligatoire, avec la liaison vidéo et phonique entre les pilotes assurant un interfaçage correct en cas de situation inattendue à évolution rapide. Les derniers accidents montrent que la paisible croisière n'est pas dépourvue de surprises. D'où l'obligation d'avoir des liaisons bord-sol suffisantes en qualité, fiables sur l'ensemble du réseau de la

compagnie sans quoi cela poserait un problème de sécurité. **Les risques de cybercriminalité doivent être bien estimés**.
On se trouve ici face à un problème à multiples facettes, communications, fréquences, débit de données, confidentialité, protection contre la cybercriminalité, réseaux sol et satellites, protection contre les éruptions solaires. Une interruption momentanée de communication pourrait être tolérable dans les phases de vol « tranquille », par exemple en croisière, mais pour les autres l'autonomie présentera-t-elle un niveau suffisant de fiabilité ? Comment traiter une situation analogue au bouleversement du trafic aérien le 11/09/2001 ?
Un sérieux handicap est, comme déjà mentionné, celui du délai de prise de conscience exacte d'une soudaine situation à problème alors qu'on ne se trouve pas dans le cockpit, délai pouvant aller de quelques minutes à plus de 10 minutes, généralement incompatible avec une aide efficace.

L'assistance dans les phases de vol à charge de travail importante dépend du type de cette assistance. Ainsi pour la phase d'atterrissage, la NASA préconise une aide du type marine, de « pilote de port », où la personne au sol intervient surtout dans les problèmes de navigation et d'aide aéroportuaires, et serait capable d'assister plusieurs avions en approche, donc sans une connaissance approfondie du type d'avion concerné. En revanche une situation délicate et dangereuse nécessite une aide qualifiée sur le type d'avion avec accès aux informations du bord.
La lecture du résumé de l'étude NASA citée laisse planer une ambiguïté sur la qualification des assistants au sol : ils semblent avoir une fonction multiple, copilote, *dispacher* et contrôleur de trafic.

L'interfaçage

Avec notre tendance normale à la simplification nous analysons les automatismes d'un côté, et l'Humain de l'autre. Cependant, depuis le début de cet exposé la plupart des problèmes évoqués concernent la liaison entre les deux faces du même problème, la façon dont les deux entités « automatiques » s'entendent entre elles, les deux super-agents se coordonnent, et **se font mutuellement confiance : des agents en étroite collaboration**. Cet interfaçage conditionne le bon fonctionnement de l'ensemble, ce que nous rappelons ici. Ce qui suit se réfère implicitement à tout ce qui a déjà été dit sans le détailler à nouveau.
L'interfaçage est la partie la plus importante de la dualité Humain-automatismes de conduite d'un avion.

L'occurrence toujours possible de situations inattendues nécessitant une intervention rapide oblige à rendre plus facile leur **prise de conscience correcte, immédiate et non ambiguë** par les pilotes, celui à bord et ceux au sol, que la correction soit automatique ou manuelle. Pour cela, le temps étant le facteur primordial, la présentation simple et intuitive des paramètres définissant la situation est une obligation absolue, ce qui n'est pas toujours le cas aujourd'hui ainsi qu'on l'a déjà vu.
Lorsqu'elle est possible et fiable, la correction automatique est souhaitable, à condition qu'elle soit comprise et acceptée par les pilotes.

Comme il y a impossibilité de prévoir l'ensemble de situations à risque, **l'intervention de dernier recours doit rester une possibilité à l'initiative des pilotes**, avec prise de contrôle sans ambiguïté.
Petite précision : on ne préjuge pas de la position du PF responsable, à bord ou au sol.

Remarques d'ordre ergonomique
Ces remarques s'appliquent aussi à l'équipage à deux pilotes, mais revêtent une importance particulière pour le monopilote par l'absence d'un contrôle immédiat possible d'erreur par un deuxième pilote.
Il s'agit de l'interfaçage visuel/tactile de commandes et de sélections. Ne pas oublier que leur usage nécessite l'attention du pilote (actions conscientes) pour éviter les erreurs de manipulation. Les solutions actuelles, de poussoirs allumés de panneaux de systèmes et de sélection par boule/souris sur le pylône central, semblent satisfaisantes.
En revanche le souci d'éviter les saturations de tâches par commandes vocales et/ou par toucher d'écrans risque de compliquer plus que simplifier les situations. Au vu des problèmes banals dans l'utilisation courante généralisée des ordinateurs, des « smartphones » et autres systèmes numériques, au vu du

nombre d'erreurs de tous genres qu'engendrent ces types de commande, même si en pratique ces erreurs sont en grande partie corrigées rapidement par les acteurs, on peut de demander quand leur faisabilité à bord des avions sera démontrée. Les problèmes classiques sont la reconnaissance et la compréhension vocales, la précision du toucher, la reconnaissance et la correction rapide des erreurs, tout cela fréquemment en urgence et temps limité.
Evidemment des innovations inattendues pourraient modifier ces aspects défavorables. Mais elles devront être acceptables pour les indispensables impératifs d'attention, de précision et de contrôle, convenir aux limitations opérationnelles humaines, et ne pas céder à l'effet de mode.

A bord, le cockpit

Depuis plus de 70 ans l'aménagement du cockpit est prévu pour deux pilotes côte-à-côte, avec commandes et contrôles adaptés aux tâches de chacun mais avec la possibilité de conduire l'avion à partir de chacune des deux positions.
La conduite par un pilote unique impose une nouvelle architecture du poste. A siège unique ? C'est peu probable car il faudra toujours une place pour un inspecteur, un instructeur, et/ou une assistance possible tant on peut imaginer de cas où cette assistance serait nécessaire. Donc il faudra un autre siège pilote, peut-être du genre de celui d'un instructeur de FFS (*Full Flight Simulator*) ?
Mais alors il faudra prévoir certaines commandes et certains contrôles à la disposition de cette deuxième personne, avec une complication pouvant dépasser celle d'un poste copilote.

L'autonomie, avec son usage, sa surveillance, l'ensemble des modifications souhaitables mentionnées et autres, imposera une structure d'aménagement particulière. On peut souhaiter que son étude tienne compte des impératifs posés par « l'automatisme humain intelligent », avec la prise en compte des aptitudes et des limitations physiologiques et mentales humaines, ainsi que développé tout au long de ce document.
Nous pouvons rappeler à nouveau une caractéristique humaine connue, que le confort des automatismes va renforcer : la surveillance de panneaux où tout reste nominal n'incite pas à la vigilance, bien au contraire. On peut douter de l'efficacité pour le SPO des « recettes » utilisées aujourd'hui en équipage à deux dans la tentative d'y remédier.

Poste de travail externe

Nous venons de voir que l'assistance du sol pouvait être diversifiée, menant ainsi à plusieurs conceptions différentes de poste de travail pour les pilotes-sol. Nous nous limiterons à commenter celui permettant l'aide dans les situations inattendues dangereuses à évolution rapide.

En situation critique jamais les transmissions de paramètres ou de vidéo ne pourront traduire une ambiance de cockpit avec ses bruits, ses mouvements, parfois ses odeurs (fumée), les interventions du personnel de cabine. Il est avancé que ce pourrait être un avantage, les pilotes étant ainsi à l'abri du stress causé par cette ambiance prenante, et pouvant prendre les décisions de façon plus réfléchies. En fait, dans de telles situations les réactions doivent être immédiates et l'élément essentiel est la synthèse de l'ensemble des perceptions instantanées. Il est probable que dans ce cas un pilote au sol serait aussi soumis au stress, même si la nature de ce stress ne serait pas exactement la même s'il était à bord de l'avion. Mais sait-on comment dans ce cas s'effectuerait psychologiquement ce pilotage à partir du sol, assimilable à un **pilotage virtuel** ? Bien que ne s'appliquant pas exactement aux situations de transport public, les problèmes psychologiques observés chez les pilotes de drones militaires laissent penser que le sujet mériterait considération.

Le délai de réaction nécessaire est de l'ordre d'une à quelques secondes, demandant à la fois une réplique fidèle de l'ensemble des paramètres pertinents permettant à l'assistant de prendre rapidement conscience de situation de façon fiable, avec le plus faible décalage temporel possible dans leur transmission. L'étude du Livret 5 donne des indications chiffrées sur ce point. Elle mentionne que les phases de vol « tranquille » peuvent tolérer des délais plus longs, de plusieurs minutes.

Là aussi, on peut souhaiter que l'étude des postes tienne compte des impératifs posés par « l'automatisme humain intelligent », avec prise en compte des aptitudes et des limitations physiologiques et mentales humaines.
Le problème a déjà été traité précédemment.

Sélection et formation des acteurs

Il s'agit là du traitement de l'Humain, de cet automatisme intelligent associant ses deux niveaux d'intelligence, le bas et le haut ainsi que définis précédemment. Il a une caractéristique majeure le différenciant des automatismes/prothèses, que nous imaginons et fabriquons pour lui. Dans notre échelle de temps, le siècle par exemple, **l'Humain est immuable, avec ses grandes qualités et ses limitations sévères**.
Chaque individu est différent des autres, mais comme on l'a vu précédemment le groupe humain que constitue l'ensemble des pilotes présente des caractéristiques communes fortes. Ces caractéristiques sont connues, mesurées et utilisées dans les domaines physiques et physiologiques. Bien que désormais qualitativement connues dans le domaine mental elles sont mal maîtrisées car non mesurées. Une maîtrise quantifiée deviendra possible grâce à la neuropsychologie, mais entre-temps il est déjà possible de s'appuyer sur des constats précis comme montré dans ce document.

Ainsi que mentionné plus haut, il y a 30 ans nous avons commis une erreur de jugement. Ses causes furent multiples.
Pendant longtemps, d'un point de vue financier la formation des pilotes a été considérée comme un mal nécessaire. En formation, un bon outil de maîtrise des coûts et de garantie d'obtention de performance a été, et est encore, la méthode d'analyse des moyens basée sur le « *need to know* ». La simulation a apporté le complément nécessaire de fixation mnémonique des éléments enseignés, ainsi que la possibilité d'enseigner sans risque des réactions à des situations dangereuses. Au début des années 80, les différents centres de formation des constructeurs affichaient une sorte de standard dans les formations de qualification de type de leurs avions, en particulier pour la durée de leurs cours autour de 5 semaines. Cette durée est importante car elle correspond pour les clients à « l'immobilisation improductive » de leurs équipages, d'après des règles uniquement basées sur le rendement financier des compagnies en concurrence mondiale.

Autour de 1985, l'accélération de l'introduction d'automatismes pouvait signifier une augmentation notable de cette durée. Pensant alors qu'ils allaient largement simplifier la tâche des pilotes et diminuer l'usage d'opérations « manuelles », au nom du « *need to know* » on augmenta la part de formation aux automatismes en réduisant celle du pilotage manuel, sans toucher à la durée des stages. Cette manière d'agir était favorisée par le sentiment des constructeurs qu'ils pouvaient en cette occasion diminuer le taux d'accidents dus aux erreurs humaines. L'erreur que tout le monde commettait alors était d'oublier que, dans l'introduction massive des automatismes, la formation initiale des pilotes n'avait pas pu, ou su, intégrer les changements de comportement imposés. On connait la suite : 25 ans plus tard on constatait les déficiences opérationnelles consécutives à cet abandon.

Cependant entre-temps la formation ab initio a évolué, lentement mais dans le bon sens, par exemple avec le MPL (*Multi-Pilot Licence*). Mais des progrès restent à faire, en sélection et en formation, dans la nécessaire maîtrise de soi et dans l'estimation des risques, dans la résistance au stress, dans la pratique des récupérations de situations à risque, dans l'assimilation de l'enchaînement des modes des automatismes**.** Le MPL privilégie la formation sur certains types d'avion et sur le travail en équipage. Il ne faut cependant pas oublier que devant une situation délicate surgissant brusquement **les réactions primitives sont essentiellement individuelles**, et que l'action en équipage n'est possible qu'après cette assimilation individuelle des données de la situation. **L'éducation à la reprise manuelle de situations, à la suite de pannes ou lors de confusion provenant de l'utilisation des automatismes, est indispensable**. Ces améliorations, en voie de lente mise en place mondiale, visent l'équipage à deux.

Elles sont encore à conforter et seront encore plus indispensables pour le pilote unique, assisté du bord ou du sol.

Une caractéristique humaine de comportement dont il faut tenir compte, et qui donne à la formation ab initio une importance majeure, est le retour quasi-automatique vers la procédure, le geste, enseignés de façon basique, face à une situation où domine le stress. Ainsi, si une procédure de récupération de situation a changé au cours du temps, la probabilité est grande pour qu'en état de surprise ou oublie le changement et qu'on applique la procédure initiale bien imprimée dans la mémoire.

Au-delà des problèmes de sélection et de formation évoqués ici, quatre points particuliers méritent l'attention.

- Aujourd'hui la formation des pilotes est initialement conduite dans des centres spécialisés, en formation initiale, en qualification de type et en recyclages périodiques. Mais elle se complète et se conforte par l'expérience in situ.
  Pour devenir CDB responsable de la sécurité des passagers de son avion, le pilote passe obligatoirement par une phase d'apprentissage sur le siège de droite comme copilote, où il apprend de façon concrète la gestion de sa mission sous la vigilance d'un CDB expérimenté.
  Malgré la puissance de la simulation permettant et renforçant de très larges apports mnémoniques (*Training by doing*) rien ne peut remplacer l'expérience des pilotes acquise en situations réelles dans la fonction de copilote agissant sous la responsabilité d'un pilote plus expérimenté. Ce point doit être regardé de près avec l'équipage à pilote unique car **l'utilisation d'une simulation de type FFS (*Full Flight Simulator*), aussi performante soit-elle, ne peut pas à elle-seule fournir la qualité et la résilience des modèles mentaux requis**.
  Alors comment imaginer la formation d'un pilote unique d'emblée obligatoirement en situation de CDB ? Sur un « *jump-seat* » ou au côté d'un ancien ? Mais n'est-ce pas la place d'un copilote ?
- L'expérience acquise dans l'exécution des programmes de qualification de type permet une certaine extrapolation de la formation des instructeurs de simulateurs FFS vers celle d'assistants au pilote unique. Ces instructeurs non navigants ont cependant une expérience antérieure de vol réel sur d'autres machines que celles sur lesquelles ils exercent leur métier. Mais, pour rester au niveau requis de compétence ils vivent leur activité d'instructeur et suivent des cours de recyclage.
  Qu'en sera-t-il pour la sélection et la formation des assistants à bord dont la fonction principale serait celle de navigant commercial ?
  Les assistants au sol seront-ils recrutés par exemple parmi d'anciens pilotes (mais de quelles machines ?) ou parmi des contrôleurs de trafic aérien ?
- On a peu d'information sur les études américaines d'estimation du nombre d'assistants au SPO, à part le nombre de 12 pour un secteur d'activité de croisière. Par rapport au nombre de pilotes uniques nécessaires dans l'exploitation d'une compagnie aérienne, combien d'assistants à bord et/ou combien d'assistants au sol seraient nécessaires, et quelle serait leur gestion ?
- Aujourd'hui, le concept SPO nécessite que le pilote à bord, seul, soit sélectionné pour son aptitude à traiter l'imprévu sans stress paralysant, et ait subi un entrainement poussé sur les missions et les interfaçages de son avion, ce qui serait encore à implémenter de façon systématique.

On peut remarquer que la règlementation européenne accepte parfois le monopilote pour l'exploitation de certains avions d'affaire dans des conditions strictement réglementées, dans un environnement cockpit-cabine confiné.

Et quel sera le coût global compte-tenu de tout cela, comparé au coût actuel des équipages à deux ?

Survie de l'équipage à deux

Il serait prématuré d'éliminer la possibilité de la persistance prolongée de la solution de l'équipage à deux pilotes. Tous les avions de transports commandés ou prévus aujourd'hui, y compris les futurs modèles présentés par les constructeurs à leurs clients, sont à équipage à deux pilotes, parfois à trois ou quatre dans les longs courriers. Compte-tenu de la vie opérationnelle moyenne des avions, 20 à 30 ans, et des problèmes qu'implique l'élimination de l'Humain du bord, les deux pilotes ne seront probablement pas chassés du cockpit avant 2040 au plus tôt.

Nous rappelons que la présence de deux pilotes à bord est dictée par une triple nécessité, sujet traité précédemment : compenser la faible fiabilité individuelle physiologique humaine, aider le pilote en fonction (PF) dans des tâches complémentaires, assurer la surveillance des actions du PF.

L'obligation pour le pilote non en fonction (PNF) d'assurer des tâches certifiées complémentaires à celles du PF est surtout dictée par la raison économique de profiter de sa présence à bord pour lui assigner des tâches opérationnelles, autres que le monitoring jugé non rentable parce que passif. Une conséquence est que souvent l'attention de ce PNF est trop concentrée sur ces tâches au détriment de l'important monitoring. C'est la raison nous amenant à continuer à utiliser le terme de PNF, et de ne pas utiliser ici les mots pourtant désormais en usage de *PM, Pilot Monitoring*.

Cependant dans une situation dangereuse à évolution rapide, prise comme cas enveloppe, alors que le PF est totalement pris par la conduite souvent délicate de l'avion, le PNF lui apporte l'aide nécessaire à maîtriser l'état évolutif des systèmes de l'avion.
Cette aide peut aussi consister de façon naturelle à une complémentarité dans les diagnostics et les choix de solutions. L'ensemble de deux cerveaux plongés dans une même situation peut donner un diagnostic et une solution efficace plus surement que le ferait un seul (CRM bien appliqué). A contrario le PNF peut s'avérer parfaitement inefficace. Des exemples des deux cas peuvent être cités[142], mais il serait intéressant de savoir quel poids a chacune des deux éventualités dans la réalité quotidienne. Aucune statistique n'existe à notre connaissance.

Nous avons vu que de nombreuses améliorations pouvaient être apportées à la conduite des avions par le duo Humain-automatismes/prothèses, bénéfiques pour la conduite des avions à deux, ou à un seul pilote à bord.
La nécessité réglementaire d'avoir dorénavant en permanence deux personnes dans le cockpit vient renforcer le maintien du deuxième pilote, bien que la fonction de pilote ne soit pas explicitée pour la personne complémentaire.

Cependant il faut se remémorer un fait oublié. En 1978 les deux avions bimoteurs gros porteurs en développement, l'A310 et le B767, étaient conçus en équipage à 3, deux pilotes et un mécanicien navigant. Airbus Industrie a décidé, sous la pression du marché et surtout **grâce à des résultats expérimentaux concrets sur A300 B4 entérinés par les autorités de certification**, de convertir l'A310 (ainsi que l'A300-600) en équipage à deux, ce qui fut fait en 2 ans, Boeing suivant le mouvement avec son B767.
Soumis à la concurrence commerciale la réaction des constructeurs peut parfois être d'une rapidité surprenante. Cependant elle reste soumise à la vigilance des Autorités garantes de la sécurité.

Emergence de systèmes

Ce qui précède nécessite l'édification **d'un véritable système air-sol de conduite de l'avion** devant être étudié, conçu et développé tout en se complexifiant progressivement. Les éléments majeurs de décision resteront :

[142] Id° 117

- l'économie opérationnelle, y compris la sélection et la formation de l'ensemble de tous les personnels, leur gestion, les supports techniques ;
- la qualité et la fiabilité des communications sol-bord ;
- la récupération rapide de situations critiques ;
- le taux de risque acceptable.

Ce genre de système complexe est basé sur des liaisons de télécommunications très fiables avec suffisamment de canaux hertziens disponibles. Le problème de la cybercriminalité est à regarder de près dès qu'on admet la nécessité d'une prise d'autorité à distance par une organisation au sol.
Un tel système serait probablement acceptable financièrement pour des organisations, des compagnies structurées et importantes. Qu'en serait-il pour les compagnies à bas coût et pour l'aviation d'affaire ? Regardons cette dernière.

L'organisation de l'aviation d'affaire est de type individuel, avec les caractéristiques de grande flexibilité opérationnelles pour le transport de petits groupes. L'agencement de l'interfaçage des cockpits évolue en général plus rapidement que celui dans le transport classique. Les progrès de l'autonomie amèneront naturellement à considérer qu'un seul pilote à bord est nécessaire, ce qui est déjà parfois le cas, gérant les fonctions de haut niveau en temps réel suivant les exigences particulières de la mission.
C'est peut-être acceptable pour la sécurité compte-tenu du volume global des heures de vol de l'ensemble des avions d'affaire inférieur à celui du transport classique, rendant acceptable le relativement faible taux de fiabilité du pilote humain. Peut-être aussi parce que la population concernée est habituée à prendre des risques ?

On peut aussi imaginer l'utilisation des services d'une organisation mondiale assurant le secours sol en cas de déficience du pilote, ainsi que le cas de terrorisme évoqué. Est-ce transposable à l'ensemble du transport aérien ?
Le regroupement de plusieurs compagnies dans des centres opérationnels communs est aussi imaginable. Ce sont beaucoup d'hypothèses de solutions.

5ème partie : PERSPECTIVES ESTIMEES

Evolution estimée

Ce qui précède est basé sur ce qui paraît envisageable à partir de la situation présente. L'étude, limitée à l'avion, est basée essentiellement sur les aspects opérationnels de mission de transport aérien, avec l'hypothèse de base que les automatismes et l'autonomie en découlant assistent des humains toujours en charge de gérer la mission. En revanche, pour ces aspects opérationnels une autre démarche inverse aurait consisté à définir l'autonomie complète appliquée à un transport aérien entièrement automatique, et ensuite à revenir sur ce qui serait impossible à tenir sans présence humaine, à l'aide d'analyses de fiabilité des systèmes en fonctionnement dans des combinaisons de situations, des possibilités de secours et sauvegarde, des risques encourus, de leur probabilité d'occurrence. Elle aurait nécessité une étude originale complexe et détaillée, pas forcément en accord avec une réalité vécue, alors que les analyses présentées plus haut amènent déjà à se poser des questions fondamentales sur la faisabilité présente ou aisément imaginable du « tout automatique » nécessaire. C'était au-delà des possibilités d'une simple recherche comme la nôtre consistant à déceler des tendances pour en déduire des recommandations.

Mais l'évolution n'est pas uniquement fonction de considérations opérationnelles, disons techniques pour simplifier. Son principal moteur dans notre société actuelle est d'ordre économique, avec des contraintes fortes, sociétales, juridiques et écologiques. Cela a été évoqué plusieurs fois dans ce livret, mais sans être traité car ces facteurs déterminants sont multiples, interactifs, parfois antagonistes,

certains variant rapidement de façon imprévisible. Nous resterons donc sur le terrain à peu près logiquement stable de l'opérationnel humano-technique, tout en tenant compte qualitativement de tendances détectables d'évolution.
Ce choix est parfaitement justifiable par l'observation séculaire de la primauté de l'augmentation de la connaissance scientifique et technique, donc technologique.

Pour l'aéronautique cette tendance irrépressible évolue en parallèle dans deux domaines se complétant, chacun gardant une partie importante de son autonomie tout en interférant sur l'autre :
- la recherche et l'innovation technique, avec pour résultat une augmentation d'allure exponentielle des connaissances technologiques et humaines (cependant dans la nature l'évolution exponentielle aboutit toujours à des limites…);
- l'exploitation commerciale de l'aéronautique civile soumise aux lois de la concurrence et du profit.
On n'arrêtera pas l'avancée des connaissances, faisant partie du logiciel humain de base. C'est le domaine de la recherche, fondamentale et appliquée. Mais l'application concrète, tangible, de ces connaissances est soumise aux aléas économiques des deux acteurs principaux, l'utilisateur compagnie aérienne et le fournisseur constructeur, utilisant cette avancée au gré de leurs intérêts concordants.
Cependant cette multiplicité d'intérêts est soumise à l'arbitrage d'un troisième acteur, l'autorité de certification garante de la sécurité publique, subissant parfois la pression des intérêts des autres acteurs impliqués.
Tout ceci pour dire que l'évolution vers l'automatisme généralisé ne peut pas s'interrompre mais que, soit elle s'adaptera au mieux de l'alliance efficience-sécurité en assignant aux deux agents, l'Humain et la machine, ce que chacun peut faire de mieux, soit elle ira vers des solutions à fort risque, la première hypothèse étant la plus probable.

Nous pensons que concrètement la configuration de transport aérien tout automatique ne pourrait exister que lorsqu'on aurait récolté une expérience suffisante des autonomies plus ou moins avancées acquises pas à pas, par éléments ajoutés ou remplacés, combinés entre eux, ayant satisfait à une expérience suffisamment probante en efficacité technico-financière, en sécurité et en acceptation des contraintes environnementales associées.
Expérience probablement non exempte d'incidents et d'accidents, de déboires, pourvu que leur taux reste acceptable pour les utilisateurs et le public, ce qui implique une allocation quantitativement raisonnable du taux d'occurrence des risques associés à chacun des paramètres-clés de sécurité, et surtout à toutes les combinaisons imaginables de situations.
On peut donc penser sûre l'introduction progressive de l'autonomie, c'est-à-dire l'extrapolation prudente de ce qu'on observe aujourd'hui (par exemple avec le *BTV, Brake-to-vacate,* ou avec le maintien des automatismes dans certains modes dégradés de commandes de vol de l'A350) en notant que **la décision finale appartient encore au pilote**,

Malgré la forte pression généralisée en faveur du SPO, il ne sera pas adopté d'emblée pour le transport de passagers au-delà de ce qu'il est aujourd'hui dans les avions de taille réduite. Au préalable **il faudra prouver quantitativement que les défauts et les coûts de l'équipage à deux supplantent ses avantages**, eux laissés non quantifiés parce que banals, mais nécessitant désormais une évaluation objective. Il faut aussi insister sur le fait que l'opération à deux dans le cockpit peut être améliorée, et savoir comment l'équipage à deux participe à la diminution observée du taux d'accidents.
Le SPO sera probablement expérimenté, d'abord dans des situations à moindre risque, comme en phase de croisière ou sur des vols court courrier, avant d'être extrapolé plus largement. Ainsi que nous l'avons montré dans cette étude nous ne croyons pas en la légitimité des seuls essais sur simulateurs, nécessaires mais insuffisants, tant est complexe l'ensemble du système opérationnel associé aux nombreux aléas inattendus.
De toute façon, d'ici 2050, les contraintes et les problèmes à résoudre mentionnés ici sont d'une telle ampleur qu'il faudra du temps aux autorités de certification pour accepter ce SPO en dehors de cas limités et spécifiques. L'estimation des risques dans cet ensemble complexe nécessite désormais l'usage

généralisé des probabilités d'occurrences de combinaisons de situations ainsi que le montre clairement le livret 5.
Sans mentionner comment se passera la cohabitation des avions à deux pilotes et de ceux à un seul pilote.

Le « tout automatique » doit gagner le franchissement de la barrière du « non déterminisme ». Pour cela l'évolution de l'intelligence artificielle forte suit, en plus difficile, le pas à pas de celle de l'autonomie déterministe. Elle doit inclure la faculté d'apprentissage automatique qui, si elle devient éventuellement possible, oblige à traiter les problèmes de validation et de certification, basées sur l'acceptation de combinaisons de logiciels toujours élaborés et définis par des humains. Là aussi études et expérimentations sont à mener.
En fait ce pas-à-pas de l'évolution va donc apparemment suivre en gros les lois de l'évolution de Charles Darwin dans un environnement complexe où il est difficile et risqué de juger a priori quels sont les facteurs les plus déterminants chez les humains. Avec cependant un paramètre qu'il n'avait pas prévu : le système en évolution subit l'influence interne directe des humains qui la subissent et la gèrent. L'environnement externe seul ne conditionne plus l'évolution, ce qui la rend un peu plus imprévisible.

Arbitrage de l'évolution

Ainsi que déjà mentionné, complexe et avec de multiples intérêts parfois divergents, l'évolution nécessite des arbitrages.
La sécurité est un impératif reconnu et primordial du transport aérien mais ce n'est pas l'élément décisif faisant avancer son évolution. L'innovation technologique, apanage des constructeurs pour des motifs concurrentiels, et la rentabilité financière souci constant des exploitants, sont les éléments majeurs de cette évolution, qui doivent composer avec la sécurité, permanente préoccupation des passagers clients. L'arbitrage est donné par les autorités de certification garantissant un taux de risque acceptable pour les passagers, et parfois par le public via les médias !
Le rôle des autorités est quelquefois ingrat car il se situe en général en aval des innovations venant des constructeurs, qui les accusent parfois de gêner les évolutions. Il est complexe, car devant à la fois encourager et encadrer les progrès du secteur en promouvant à la fois le développement du potentiel technologique (recherche), du tissu industriel (avec des impératifs d'efficacité économique), et veiller à l'amélioration du niveau de sécurité.

Ainsi dans la course à la diminution du nombre de pilotes dans le cockpit, ce document s'est efforcé de donner des pistes de recherche pour mesurer aussi objectivement que possible l'efficacité d'innovations technologiques, les risques encourus par les changements, les coûts associés, en mentionnant au passage quels arguments, non vérifiés et peu crédibles, sont avancés en justification de la diminution. Tout cela doit s'appuyer sur des estimations probabilistes de situations opérationnelles, basées sur des quantifications crédibles, exigeant de nombreuses expérimentations et observations en vol réel aussi bien qu'en simulation.
Cela devrait permettre de savoir si cette diminution d'équipage est ou non raisonnablement envisageable. Ou bien dans quelles conditions acceptables elle le serait.

Devant l'imbrication complexe mondiale des intérêts de chacun des acteurs, les arbitres sont indispensables. Ils existent, ce sont l'OACI et les autorités réglementaires pouvant canaliser l'évolution, orienter et promouvoir les nécessaires études et expérimentations. Certaines ont déjà été lancées en Europe et aux USA, mais apparemment sans le souci de savoir où et quand l'intervention humaine reste positive et nécessaire.
Les objectifs sont l'estimation des risques et celle, souvent sous-estimée par l'ensemble des acteurs, de l'amplitude des coûts des changements impliqués.

Avec l'augmentation de l'automatisation l'autonomie apportera un accroissement du nombre d'algorithmes et de leurs combinaisons, allant de pair avec l'augmentation de la complexité des systèmes. La validation et la certification de tels systèmes complexes nécessiteront probablement l'adoption de critères nouveaux et des méthodes inédites à trouver.

Un autre problème mis récemment en lumière par l'accident du vol Germanwings 4U 9525 est l'apparition de menaces inattendues provenant de la mise en place de protections contre des menaces identifiées. Il faudra une grande prudence dans l'adoption d'innovations, avec une estimation poussée des risques secondaires encourus. Il faudra aussi une grande résistance aux actions lancées prématurément sous la pression médiatique.
La défense contre la cybercriminalité est à regarder de près.

Conclusion et Recommandations

Le transport aérien mondial ne peut se permettre une révolution dans la gestion opérationnelle de ses avions. Il avance pas à pas dans l'amélioration de son efficacité financière et dans celle de la sécurité, au rythme des avancées technologiques.
L'introduction de l'autonomie et la diminution du nombre de pilotes à bord sont des évolutions majeures nécessitant qu'on prenne le temps de la réflexion et de la mesure. L'équipage à deux a, au minimum, une survie de quelques décennies, ne serait-ce que par l'existence de milliers d'avions à équipage à deux d'une durée de vie de plusieurs décennies. Sans oublier les décisions officielles d'avoir obligatoirement deux personnes dans le cockpit.
Avec de surcroit un taux actuel d'accidents près de son plancher et admis implicitement par tous les acteurs, mais il est vrai pas nécessairement par le public.

RECOMMANDATIONS

L'étude a permis de dégager des secteurs d'attention particulière dans la maîtrise de l'évolution, dont nous donnons une liste comme :

1. **– Amélioration des systèmes actuels.**
   Une liste non exhaustive de 11 points est donnée au paragraphe « Exemples de prothèses mentales ».
2. **– Amélioration de la sélection et de la formation des pilotes en matière de maîtrise de soi face aux risques immédiats.**
3. **- Nécessité d'une connaissance quantifiée des interventions positives humaine dans le cockpit face aux imprévus et inattendus potentiellement dangereux.**
4. **– Orientation de l'utilisation des facteurs humains dans les relations Humain-automatismes en introduisant, dans les études, projets et réalisations mixtes, les limitations humaines au même titre que celles des matériels.**
5. **– Introduction de la neuropsychologie dans les recherches sur le comportement opérationnel humain.**
6. **– Systématisation du concept HSI (Human-Systems Integration)[143].**
7. **– Estimation réaliste des moyens permettant la réduction du nombre de pilotes à bord, y compris pour l'assistance du sol (technicité, fiabilité, formation), sans compromettre la sécurité.**

[143] International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace. HCI-AERO 2016 (September 14-16 2016). DGAC, Paris

8. **– Introduction des innovations basée sur le calcul réaliste des estimations de risque dans les combinaisons de situations banales et potentiellement dangereuses, avec un soin particulier pour celles de faible probabilité d'occurrence.**
9. **– Etude de méthodes de validation et de certification intégrant la complexité des « logiciels », y compris ceux à tendance non déterministe.**
10. **- Estimation réaliste des coûts, pour chacun des acteurs concernés, à bord et au sol, de la diminution du nombre de pilotes à bord.**
11. **– Etude de l'évolution des responsabilités dans l'usage de l'autonomie et dans le partage des tâches entre bord et sol.**

Noter que les recommandations 1 à 6 ne sont pas spécifiques à la diminution des équipages.

Nous terminons par un conseil :

Attachons-nous à améliorer la sécurité et l'efficience des opérations en équipage à deux, ce qui est possible et souhaitable, la recherche de l'autonomie partielle ou totale en étant un élément essentiel.
Le reste viendra de lui-même.

ANNEXE : Vigilance sur les vols longs courriers
(Jean-Claude Bück, Membre de l'AAE)

Définition

Vigilance : surveillance soutenue et attentive ; état dans lequel on est prêt à réagir. Il est amusant de noter que les Anglais donnent comme synonyme au mot vigilance (alertness) : «on the qui vive ». La vigilance est la capacité d'un sujet à répondre de façon adaptée et soutenue à un ensemble de stimuli d'après les neurophysiologistes.
La vigilance est primordiale quand on attend quelque chose d'important et, a fortiori, quand des vies humaines sont en jeu ; ce qui est le cas au cours d'un vol commercial quelle que soit la durée du vol. On conçoit aisément que plus le vol est long, plus il est difficile de rester vigilant.
Pour rester vigilant, il faut être en bonne condition physique et mentale, il faut être motivé et on a besoin d'information.
Condition physique et mentale :
Si on est fatigué, épuisé, si on est sous l'influence de l'alcool, d'une drogue ou d'un médicament inapproprié, si on a fait un repas trop copieux, il est difficile d'être vigilant.
Motivation :
Si vous êtes très intéressé par ce que vous faites : chasse, pêche, pratique d'un sport, si vous regardez un film d'action, si vous lisez un roman policier haletant, il est facile d'être vigilant.
Information :
Pour être vigilant, il faut de l'information. « L'homme ne peut rester vigilant sans information »[144]. Vous pouvez regarder un feu de bois dans la cheminée pendant des heures. Les flammes en mouvement perpétuel sont de l'information. Vous n'êtes pas capables de concentrer votre regard sur un foyer vide. Prenons un meilleur exemple. Vous êtes dans votre voiture, arrêté à un feu rouge. Vous n'êtes pas capable de fixer cette lumière rouge. Vous regardez autour de vous, vous parlez à vos passagers, peut-être regardez-vous la jolie fille dans la voiture à coté de vous et, quand le feu passe au vert, vous ne le remarquez pas jusqu'à ce que la voiture derrière vous commence à klaxonner. Parce qu'il n'y a pas d'information dans un feu rouge fixe.

La vigilance peut être :

[144] Jean-Claude Wanner

Active et déterminée :

- Une mère de famille traversant la rue avec ses enfants
- Un joueur de tennis analysant ses sensations pour anticiper les réactions de son adversaire
- Un pilote au cours d'une approche aux instruments en mauvaises conditions météo

Passive, le résultat de l'expérience et de l'entrainement :

- Une mère de famille sur une plage bavardant avec une amie en surveillant du coin de l'œil ses enfants qui jouent
- Un joueur de tennis qui mène largement et qui perd sa concentration
- Un automobiliste qui écoute la radio en rentrant chez lui par le chemin habituel. Dans ce cas, il revient à la vigilance active dès qu'il reçoit une information appropriée : travaux signalés, sirène d'une voiture de pompiers, coup de frein du véhicule le précédant etc…

Vigilance dans un cockpit

Au cours d'un vol le pilote doit accomplir certaines tâches :
Court terme :

- Recueillir les informations fournies par les instruments et le monde extérieur
- Analyser ces informations
- Détecter les déviations par rapport à la trajectoire prévue (plan de vol)
- Faire les corrections nécessaires

Périodiques :

- Aux points tournants, vérifier la nouvelle route et les paramètres essentiels (distance au point suivant, consommation de carburant, cohérence avec les indications des balises radio disponibles et repères visuels)
- Envoyer un message de position si nécessaire
- Envisager un changement de niveau de vol si nécessaire

Stratégiques :

- Si nécessaire, éviter les zones orageuses
- Surveiller la situation météo sur la route et à l'arrivée
- Anticiper les procédures de descente et d'approche en gardant à l'esprit que l'on peut avoir à se dérouter pour des raisons mécaniques, médicales voire même politiques

Tout cela en pilotant l'avion en permanence.

De nos jours le pilote peut utiliser un pilote automatique performant connecté au système de gestion de vol (Flight Management Système) associé à des auto-manettes qui gèrent le régime des moteurs pendant tout le vol sauf pendant le décollage. La tendance actuelle chez certains constructeurs et au sein de certaines compagnies aériennes est de demander aux pilotes de brancher le pilote automatique aussitôt après le décollage jusqu'à l'atterrissage. Cette tendance a des effets catastrophiques sur le maintien des compétences des pilotes ; heureusement nombreux sont les pilotes qui préfèrent piloter manuellement pendant la montée et la descente pour s'entrainer et parce qu'ils aiment cela. Une étude récente a montré que les pilotes d'une nation qui a une longue tradition aéronautique civile et militaire passent plus de temps à voler manuellement que ceux de pays sans passé aéronautique.

Sur les vols courts, il n'est pas difficile de rester vigilant, si toutefois le pilote a pu se reposer correctement avant le vol. Les procédures au décollage, la montée, la descente, l'approche et l'atterrissage se succèdent rapidement l'occupent en permanence et les fréquents contacts radios suffisent à le maintenir vigilant.

Sur les vols long courrier, il n'en est pas de même. Le décalage horaire et la durée du vol comportant obligatoirement une période correspondant à un besoin naturel de sommeil diminuent la vigilance. Pendant le vol de croisière, le pilote passe des heures à surveiller le pilote automatique dans un environnement peu favorable (pression atmosphérique réduite, ce qui veut dire moins d'oxygène dans

le sang, taux d'humidité très faible, bruit etc…). La plupart du temps les contacts radios sont rares. Ils sont même supprimés sur les parcours transatlantiques où existe un système de transmission automatique des données ACARS (Automatic Control and Reporting System) et au-dessus des Etats Unis où les radars sont très performants. Enfin, comme les avions sont très fiables, le sentiment inconscient qu'il ne va rien se passer contribue à diminuer la vigilance.

Comme il a été dit plus haut, l'information est nécessaire pour maintenir la vigilance. Pendant la croisière, il n'y a pratiquement pas d'information dans le cockpit à l'exception du défilement très lent de la carte sur la planche de bord. Pour maintenir leur vigilance, les équipages s'occupent en vérifiant périodiquement les paramètres de vol. Dans certaines compagnies on demande au personnel de cabine de prendre contact périodiquement avec les pilotes ; mais ce n'est pas suffisant. Une solution peut-être de lire des textes courts comme par exemple des articles de journaux. Mais l'Etat-Major des Compagnies, les représentants de l'Autorité et même le public peuvent trouver cela scandaleux : les pilotes ne sont pas payés pour lire le journal. Très bien ! Pourtant l'Autorité et l'encadrement des pilotes ne voient aucun inconvénient à ce que les pilotes lisent les notes techniques et opérationnelles ainsi que les manuels techniques dont ils disposent. Comme les vols long courrier sont de plus en plus longs, les pilotes n'en font que trois par mois et, à chaque départ, ils trouvent un nombre incroyable de documents techniques dans leur boite à lettres.
Le personnel en charge du fonctionnement des centrales nucléaires est dans la même situation que les pilotes. Ils passent des heures interminables devant des panneaux couverts d'instruments qui ne bougent pas beaucoup quand tout va bien. Sur le conseil d'un expert de renommée mondiale, mon confrère de l'Académie Jean Claude Wanner, EDF a fini par accepter qu'un écran de télévision soit installé dans les salles de contrôle avec toutefois quelques restrictions sur la nature des films diffusés.

L'éveil

Nous arrivons maintenant au point où, avant de se demander comment rester vigilants, les pilotes se demandent comment rester éveillés. Pour répondre à cette question, nous avons besoin d'en savoir un peu plus sur les rythmes biologiques auxquels sont soumis tous les êtres vivants et en particulier les êtres humains.

Il y a d'abord le rythme annuel, le rythme des saisons.

Vient ensuite le rythme quotidien, le rythme nycthéméral ou circadien suivant que l'on est helléniste ou latiniste, c'est-à-dire l'alternance du jour et de la nuit. Nous avons une horloge biologique interne synchronisée en permanence par le soleil. Cette horloge régit nos paramètres vitaux : température corporelle, pression sanguine, volume des fluides corporels etc. Les sécrétions des glandes internes varient pendant la journée. Ces variations ont une influence sur nos performances. Tous les athlètes savent que l'on ne bat pas de records le matin mais l'après-midi ou le soir. Les médecins savent que l'efficacité des drogues et des médicaments varie avec l'heure de leur prise.

Différentes études montrent que, entre 4 heures et 7 heures du matin, quand la température du corps est la plus basse, la vigilance décroit. Les statistiques montrent que les chauffeurs routiers ont plus d'accidents pendant cette période. Il en est de même pour les pilotes. L'armée de l'air israélienne planifiait les vols d'entrainement de ses pilotes tôt le matin parce que la température était plus fraîche et l'espace aérien moins encombré. Leur taux d'accidents était élevé et s'est sensiblement amélioré quand il a été décidé de ne pas commencer l'entrainement avant 7 heures du matin.
Lorsque l'on fait des vols long courrier, le décalage entre l'heure locale et celle de votre horloge biologique provoque des troubles (jet lag). Si vous êtes basé en Europe et si votre décollage de Los Angeles est prévu à 10 heures du soir, il est 6 heures du matin à votre horloge personnelle et vous devez être très prudent.
Quand vous restez plusieurs jours loin de votre base, le soleil local commence à remettre à son heure votre horloge personnelle sur la base d'environ une heure par jour.

Dernier rythme : le rythme du sommeil :

Vous êtes éveillé, vous vous mettez à bailler, vos yeux commencent à papilloter, votre tête à tendance à s'affaisser, vous avez envie de dormir. Si vous résistez à cette envie, le besoin de sommeil disparait au bout d'un certain temps pour revenir une heure et demie plus tard.
Vous avez probablement entendu parler des cycles du sommeil. Ils durent environ 90 minutes et commencent chaque jour à la même heure tant que vous restez dans votre fuseau horaire.
Un cycle de sommeil est divisé en différentes phases faciles à reconnaitre à la lecture d'un encéphalogramme.

Phase 1 : Sommeil léger. Il est important de noter que cette phase est inconsciente. Si on vous réveille pendant cette phase, vous direz probablement que vous ne vous êtes pas endormi.

Phase 2 : Sommeil léger. On vous réveille facilement et vous admettez vous être endormi.

Phases 3 et 4 : Sommeil profond. Il est difficile de vous réveiller, en particulier dans la phase 4, il vous faut un certain temps pour être complètement éveillé et pour que votre cerveau fonctionne correctement. Vous avez du mal à saisir la situation et à prendre des décisions.

Phase 5 : Sommeil paradoxal. C'est la période du rêve pendant laquelle votre corps est paralysé à l'exception des yeux qui effectuent par moments des mouvements rapides sous les paupières. Les Anglo-Saxons appellent cette phase REM (Rapid Eyes Movements).

Après un cycle de sommeil, vous vous réveillez brièvement avant de commencer le cycle suivant. Les bons dormeurs ne gardent pas en mémoire ce bref réveil alors que les mauvais dormeurs ont tendance à en exagérer la durée.

Pour rester vigilant pendant un vol, il faut rester éveillé. Vous êtes en bonne forme, vous vous êtes reposé avant le vol et vous avez dormi dans la mesure du possible. Ce qui n'est pas toujours le cas. La chambre était bruyante, le conditionnement d'air déficient, votre horloge biologique ne vous donnait pas envie de dormir… ou tout simplement vous avez préféré jouer au tennis ou au golf avant le « ramassage ».
Une fois dans le cockpit, vous êtes très occupé avec les vérifications avant le vol, les check-lists, les procédures de mise en route, de roulage au sol, de décollage et de montée. Par la suite, pilote automatique engagé, tous les paramètres vérifiés, vous pouvez vous détendre et vous préparer à de longues heures de surveillance. Vous avez été formé à travailler en équipe avec votre co-pilote et cette formation est remise à jour au cours de stages périodiques.

A un moment donné, vous sentez venir le début d'un cycle de sommeil chez vous ou chez le co-pilote: yeux qui papillotent, silence total, désintérêt pour le monde extérieur, vous ne répondez plus aux stimuli externes. Vous pouvez décider de résister au sommeil qui se fait pressant. Après une quinzaine de minutes, il disparaitra pour revenir 90 minutes plus tard. Pour résister, vous remuez la tête, parlez à l'autre pilote, vous vous étirez, prenez une tasse de café etc… Pendant cette période vous n'êtes pas complètement opérationnel. Si vous ne faites rien, vous rentrerez dans la phase 1 du cycle du sommeil sans vous en rendre compte. Cet abandon peut durer une minute ou plus longtemps. Il y a de nombreux rapports sur l'endormissement d'un pilote aux commandes. Un de mes co-pilotes s'est endormi au petit jour alors qu'il pilotait manuellement (pilote automatique débranché) au cours d'une approche vers Orly.

L'US National Highway Traffic and Safety Administration (NHTSA) estime que chaque année au moins 56000 accidents automobiles sont causés par des chauffeurs somnolents. Quand vous entendez le matin sur la radio qu'une autoroute est fermée parce qu'un camion s'est renversé, c'est que le chauffeur s'est endormi au volant.

Il y a une meilleure solution ; c'est de mettre en pratique ce que disait Oscar Wilde « Le meilleur moyen de résister à la tentation est encore d'y succomber » et de vous accorder une courte période de sommeil (20 minutes) sous trois conditions :

- Vous présentez des signes d'endormissement

- Vous prévenez l'autre pilote de votre intention
- Vous vous conditionnez mentalement « Je vais me relaxer et dormir pendant 20 minutes » et, 20 minutes après vous serez à nouveau alerte et en forme même si vous avez l'impression de ne pas avoir dormi car votre appréciation du sommeil est subjective et on ne peut s'y fier.

Ce bref sommeil connu en France sous le nom de « pause parking » est utilisé par les astronautes, par les navigateurs solitaires et par beaucoup de monde. Les Américains l'appellent NASA nap car la NASA (National Air and Space Administration) a dépensé des sommes très importantes pour financer des études aboutissant à la conclusion que, à la fin d'un vol très long, la performance d'un pilote pendant l'approche et l'atterrissage était meilleure si ces derniers avaient effectué une « pause parking ».
De nos jours la plupart des compagnies aériennes acceptent le principe du NASA nap après de sérieuses réticences « les pilotes ne sont pas payés pour dormir »

Vols très long-courriers

Dès que la durée d'un vol dépasse 10 heures, un ou deux pilotes supplémentaires complètent l'équipage. Jusqu'en 2004 la durée des vols ne dépassait pas 14 à 15 heures. Les 4 pilotes utilisaient deux schémas différents :

- L'équipage comprend un commandant de bord et 3 co-pilotes. Le commandant et un des pilotes effectuent la première partie du vol ; les deux autres pilotes dont un « senior » co-pilote prennent ensuite la relève pendant que la première va se reposer. A la fin du vol la première équipe revient et effectue la descente, l'approche et l'atterrissage.
- L'équipage comprend 2 commandants de bord et 2 co-pilotes. Le commandant et un des pilotes prennent les commandes pour la première moitié du vol ; la deuxième équipe effectue ensuite la fin du vol atterrissage inclus.

Depuis 2004 Singapore Airlines effectue avec des Airbus 340-500 des vols entre Singapour et Los Angeles ou New-York dont la durée peut dépasser 18 heures. Après de très sérieuses études, le Autorités et les pilotes ont considéré qu'aucun de ces deux schémas n'était pertinent.

Ils ont trouvé que la période de repos de chaque équipe devait être divisée en deux ; une des deux périodes de repos devant coïncider avec l'horloge biologique des pilotes. Ce n'est pas facile à réaliser car, en fonction des décalages horaires résultant des vols précédents, les horloges biologiques des pilotes ne sont pas forcément synchrones. De plus, Singapore Airlines demande au commandant du vol de contacter à l'avance les autres pilotes pour décider qui commencera le vol et demander aux pilotes de se mettre au lit avant le vol en fonction du moment où ils se mettront aux commandes !

La sécurité exige que les pilotes aient un temps de repos suffisant avant un vol et entre deux étapes ; les périodes étant programmées pour que les pilotes aient assez de temps pour dormir quel que soit le décalage horaire. C'est très important car les dettes de sommeil se cumulent et le cerveau humain peut arriver au point de passer de l'éveil au sommeil sans préavis.

Réveil

Il a été mentionné plus haut que le réveil au cours des phases 3 et 4 du cycle de sommeil était difficile. Vous êtes mal réveillé, vous pouvez même vous trouver dans un état de panique si vous êtes réveillé brutalement dans les profondeurs de la phase 4. Votre cerveau prend un certain temps pour retrouver toute son efficacité ; De plus vous vous sentirez fatigués pendant les heures qui suivent.
Compte tenu de cela :

- En cas de problème au cours du vol, dans le cas où il n'y a qu'un seul commandant à bord en train de se reposer, s'il faut le réveiller au cours des phases 3 ou 4, le commandant doit attendre quelques minutes avant d'agir car il faut du temps pour que son cerveau soit en mesure d'analyser la situation et de prendre la bonne décision.
- A la fin d'une période de repos, les pilotes doivent prendre leur temps avant de se mettre aux commandes. Il est préférable de ne pas changer les deux pilotes en même temps.

- Si vous êtes supposés dormir avant le ramassage à l'hôtel, évitez de vous réveiller pendant le sommeil profond. La sonnerie d'un réveil ou d'un téléphone peut avoir des effets ravageurs. Si vous êtes naturellement réveillé par exemple une heure avant l'heure de réveil prévue, n'essayez pas de vous rendormir pour un nouveau cycle de 90 minutes. Levez-vous et faites n'importe quoi. Vous vous sentirez très bien ensuite.

Les vols très longs soulèvent de nombreux autres problèmes. L'Académie de l'air et de l'espace a consacré deux forums l'un en 2004 sur les aspects techniques, économiques et commerciaux, l'autre en 2005 sur les facteurs humains associés. Le retour d'expérience de Singapore Airlines montre que tout se passe bien. Il est vrai que leur réseau leur permet d'alterner vols très longs et vols moyens courriers ce qui limite les effets des vols très longs et permet aux pilotes de satisfaire aux exigences d'expériences récentes (nombre minimum d'atterrissages et de décollage pendant le mois précédant un vol).

Conclusion

La vigilance et la gestion du sommeil sont des sujets difficiles car ils impliquent d'énormes différences individuelles.
Les Autorités sont dans l'embarras. Le NASA nap est reconnu par la majorité des compagnies aériennes mais n'est pas mentionné dans la réglementation opérationnelle. Le chapitre de la réglementation européenne qui traite des temps de service et des temps de repos en discussion depuis 20 ans n'a été publié que récemment et soulève de sérieuses réserves chez les pilotes. La réglementation dit en outre que : « Un pilote ne doit pas prendre son service dans un aéronef …s'il sait ou s'il pense que son état de fatigue peut mettre en danger la conduite du vol »

Il est donc très important que les pilotes soient instruits sur :

- La physiologie du vol en insistant sur le sommeil inconscient de la phase 1 et des troubles associés au réveil pendant le sommeil profond.
- L'observation et la connaissance de leurs cycles de sommeil personnels.
- Le bon usage du café.
- Les effets secondaires et les risques associés avec la prise de mélatonine, de somnifères et autres drogues.
- Les techniques de relaxation comme substituts du sommeil

La connaissance de soi-même est vitale pour les pilotes et pour tous.
Le travail en équipage est fondamental pour le maintien de la vigilance.

Livret 5 : APPROCHE ANALYTIQUE des EVOLUTIONS du PILOTAGE à l'HORIZON 2050

Jean BROQUET (Membre de l'AAE)

Introduction

La perspective d'une augmentation au moins dans un rapport 3 du trafic aérien de 2010 à 2050 (voir Dossier de l'Académie de l'Air et l'Espace 2013 : "Comment volerons-nous en 2050" Réf 9), associée à la contrainte sociétale implicite de ne pas augmenter le nombre annuel moyen d'accidents mortels, impose un effort constant d'amélioration de la sécurité des vols au cours des prochaines décennies. Compte tenu de la part majoritaire attribuée au pilotage dans les causes primaires d'accidents aujourd'hui, il est opportun d'analyser les possibilités de mise en œuvre opérationnelle progressive des avancées dans les différents domaines de l'automatique, de la cognition artificielle, des neurosciences, et des interactions Homme-machine dans le cadre d'une évolution, progressive elle aussi, du partage des rôles entre les Hommes et les systèmes. Il est opportun aussi de tirer tous les avantages possibles, dans des conditions économiques acceptables, d'une plus large utilisation des moyens d'échanges d'informations entre les différentes composantes du système global de transport aérien.

Une plus grande efficacité économique, y compris dans l'organisation et la mise en œuvre du pilotage des avions, sera naturellement recherchée en parallèle de l'amélioration de la sécurité des vols.

Les analyses "a priori" de sécurité de systèmes complexes tel que le transport aérien, impliquant de façon récurrente des acteurs humains, sont souvent hasardeuses notamment parce que le comportement humain est dépendant de l'espace (environnement, ...), du temps (vigilance, ...) et de leur combinaison (situations, …) (Voir Livret 4 Jean Pinet). Cette variabilité est mise en évidence par exemple dans le papier de Matthew J W Thomas (Réf 1) qui montre la différence importante entre le taux d'erreurs humaines commises et détectées sur simulateur et celles commises et détectées lors de vols commerciaux par des pilotes de même niveau d'expérience et de qualification. Cependant, afin d'orienter les travaux de recherche et développement dans le domaine du pilotage des avions, il est important d'identifier le plus tôt possible les principaux facteurs contributifs à la performance de sécurité ainsi que les leviers d'amélioration potentielle. Cette démarche est particulièrement nécessaire lorsque des approches nouvelles sont envisagées pour le transport de passagers commerciaux, telle que le pilotage avec un seul pilote à bord de l'avion.

C'est pourquoi dans cette note nous analyserons tout d'abord ce qui peut être tiré des observations lors de vols commerciaux sur le niveau de performance individuel et en équipe des pilotes avec les supports au sol et à bord d'aujourd'hui.

Nous tenterons ensuite de chiffrer ce que pourraient être les gains potentiels de sécurité liée au pilotage à l'horizon 2050 grâce à l'automatisation et à l'interconnexion.

Enfin, nous identifierons sous l'éclairage d'analyses de probabilité, les conditions de faisabilité du pilotage avec un seul pilote à bord, et notamment les exigences relatives aux nouvelles fonctions de détection de défaillance physiologique du pilote et de mise en œuvre de sauvegarde à bord et depuis le sol. Ces conditions et exigences sont à considérer en complément de celles présentées dans le Livret 4.

Partie 1 : AXES d'AMELIORATION de la SECURITE des VOLS et de l'EFFICACITE ECONOMIQUE du PILOTAGE

Le document *Civil Aviation Authority 2013*, CAP 1036 *Global fatal Accident 2002 to 2011* (Réf 2) présente des statistiques au niveau mondial relatives aux accidents d'avions de transports commerciaux (jets et turbopropulseurs) de plus de 5700 kg, avec pertes de vies humaines, au cours de la décennie

2002-2011. Il montre que les déficiences du pilotage en sont l'une des causes principales dans près de 66% des cas et plus particulièrement la cause primaire (sous partie des causes principales) dans près de 50% des cas. Le taux moyen d'accidents catastrophiques est d'environ 0,64 par M de vols, soit, compte tenu de la durée moyenne des vols de 1,7 h : 0,37 par M d'heures de vol au cours de la décennie.

Les déficiences constatées incluent des comportements inadaptés du pilote dans une situation normale ou face à une situation inattendue, dus au manque de préparation ou de formation, au non-respect des procédures (volontaire ou résultant d'interfaces Homme-Machine inadaptées), ou à des erreurs de jugement liées le plus souvent aux limitations cognitives humaines dans un contexte difficile ou stressant,..(Voir la thèse de Jean Pinet en Psychologie spécialité Ergonomie sur le "Traitement de situations inattendues" Réf 3). Les problèmes de communication avec le copilote ou avec le contrôle aérien comptent aussi parmi les causes significatives d'accidents.

Des analyses complémentaires, avec des sources difficiles à recueillir de façon formelle, montrent que dans le même temps, parmi les très nombreuses interventions des pilotes - le plus souvent lors de "situations banales"- un nombre significatif d'interventions dites "positives" permettent d'éviter des accidents potentiels dans des situations non gérables par des automatismes embarqués aujourd'hui, ou utilisables de façon fiable à court-terme à bord des avions. Ces interventions répondent typiquement à l'apparition de "menaces d'origines externes au cockpit", c'est à dire à des situations potentiellement dangereuses pour la sécurité du vol, liées à l'avion lui-même hors cockpit, au contexte ou à l'environnement.

La quantification du taux d'interventions positives des pilotes est difficile car il n'y a pas de comptabilité des situations résolues sans incident majeur. Le document en (Réf 1) relate l'observation, au cours d'une enquête de 3 mois sur deux flottes opérationnelles d'avions courts et moyen-courriers, de 1,4 "menaces d'origines externes au cockpit" potentiellement dangereuses pour la sécurité, en moyenne par vol. Un autre document en (Réf 5) de Robert L. Helmreich1, James R. Klinect, & John A. Wilhelm relève des nombres de "menaces" respectivement de 3,3, 2,5 et 0,4 par vol, sur des ensembles de vols de 3 compagnies aériennes. Bien que différents, ces nombres restent du même ordre de grandeur. Jean Pinet estime que la valeur moyenne de 1 "intervention positive" de l'équipage par vol sur des vols de durée moyenne 1,7 heure (jets et turbopropulseurs de plus de 5,7 tonnes) est un ordre de grandeur assez réaliste.

Les deux aspects, l'un négatif, l'autre positif du comportement humain dans le pilotage aujourd'hui expliquent la difficulté d'améliorer rapidement la sécurité du pilotage en évoluant vers plus d'automatismes embarqués. Cette difficulté est d'autant plus grande que les automatismes actuels ont été conçus au cas par cas, de façon opportuniste, pour répondre à des problèmes particuliers suivant la disponibilité technologique et en fonction de critères économiques spécifiques, de sorte qu'une refonte globale, en repartant du niveau système, des automatismes embarqués serait nécessaire.

La validation d'une telle refonte globale aurait un coût élevé et un risque important d'échec.

En conséquence, la plupart des recommandations d'amélioration élaborées pour le court terme portent principalement sur la formation des pilotes ainsi que sur la qualité des procédures et des échanges d'informations au sein du cockpit en privilégiant curieusement les améliorations difficiles et problématiques du comportement humain dont les capacités intrinsèques restent immuables (sauf si les pilotes peuvent être sélectionnés sur des capacités mentales appropriées, avec des critères aujourd'hui peu définis). Ces recommandations se heurtent notamment à la difficulté de former des pilotes à des situations qu'ils ne rencontreront statistiquement jamais.

D'ici à 2050 des progrès significatifs sont prévisibles notamment dans les domaines suivants :

- Automatismes en général, y compris "cognition artificielle", avec une plus grande robustesse/résilience et donc une plus grande sécurité des systèmes embarqués, permettant de diminuer la charge de travail des pilotes, y compris lors de situations critiques imprévues,

- Autonomie pour certaines phases de vols ouvrant la possibilité d'effectuer un certain nombre d'opérations de pilotage avec prise de décisions par la machine sans surveillance humaine continue,

- Interface Homme-machine avec une plus grande facilité pour l'Homme à appréhender les situations et à agir en utilisant au mieux la complémentarité de ses capacités propres et de celles de la machine,

- Télécommunications (avec une plus grande disponibilité des liaisons à haut débit, une offre mieux adaptée aux besoins de l'aéronautique et un coût d'utilisation relativement plus faible qu'aujourd'hui) permettant notamment d'augmenter très significativement les possibilités d'échanges entre avions et avec le sol.

Compte tenu du niveau d'amélioration recherché simultanément pour la sécurité et l'efficacité économique, il est raisonnable d'anticiper à long terme des évolutions sensibles dans la mise en œuvre du pilotage et notamment dans la répartition des fonctions de pilotage et de gestion du vol entre le bord (l'avion) et le sol et entre l'Homme et la machine. Cependant quels que soient les développements en cours ou futurs de différentes formes d'intelligences artificielles incluant la cognition et la prise de décisions, il est très peu vraisemblable que ces intelligences copient et dépassent dans tous les domaines celle de l'Homme à l'horizon 2050 voire à l'horizon 2100. Il y aura donc probablement encore longtemps intérêt à conjuguer les capacités de l'Homme (intervenant à bord des avions et/ou depuis le sol) et de la "machine" (automatismes, Intelligences artificielles, …) pour le pilotage des avions de transports commerciaux de passagers.

La mise en œuvre effective d'un pilotage d'avions (ou de drones) par des pilotes basés au sol est potentiellement limitée sous trois aspects :

- Délai d'établissement des liaisons de communication ou coût des liaisons dans le cas où elles seraient maintenues en permanence, et temps de latence récurrent (délai de transmission entre le sol et l'avion, variable selon la longueur du trajet des communications et le protocole utilisé) qui peut être significatif pour certaines actions court terme relatives au pilotage,

- Délai de prise de conscience exacte d'une situation inattendue dangereuse du vol pour un intervenant hors de l'avion, privé de certaines informations qu'un pilote à bord reçoit par ses propres capteurs sensoriels, ainsi que du suivi détaillé des évolutions dans le cockpit,

- Erreurs, interruptions ou intrusions dans les transmissions (résultant de problèmes techniques ou d'actes de malveillance) qui imposent de prévoir au minimum une autonomie momentanée de l'avion par rapport au sol.

Pour ces raisons et malgré l'accumulation d'expérience dans le télé-pilotage des drones au cours des prochaines décennies, la présence d'au moins un pilote à bord des avions de transport de passagers, est considérée comme hautement vraisemblable à l'horizon 2050.

Nous aborderons dans ce document les deux domaines de réflexion suivants :

- Amélioration de la sécurité du pilotage par rapport à la situation actuelle dans le cas d'équipages avec deux pilotes à bord pour les vols court et moyen-courriers,

- Conditions à satisfaire, notamment par le support sol, pour rendre possible une évolution au moins partielle, vers un pilotage avec un seul pilote à bord pour les vols court et moyen-courriers sans réduction sensible de la sécurité des vols.

Par extension nous analyserons succinctement le cas des vols long-courriers avec un seul pilote à bord.

Performances du pilotage au début des années 2000

On fait principalement appel dans ce chapitre à des ensembles de données recueillies à partir de vols commerciaux opérationnels et publiés dans des documents référencés dans cette note.

Les performances des équipages sont généralement caractérisées selon plusieurs composantes principales : *Non maitrise du pilotage, Omission ou action inappropriée, Perte de repère concernant la position de l'avion, Mauvaise appréciation de la situation et manque de professionnalisme, Utilisation insuffisante des techniques, méthodes et outils, Non-respect délibéré des procédures.*

Une telle décomposition aide à l'analyse des faiblesses et donc des améliorations potentielles dans les domaines de la formation et de la discipline des pilotes, de la coopération entre les pilotes et entre pilote et services support, de l'équipement de l'avion, de l'interface Homme-machine, ... Elle est utilisée sous cette forme ou sous une forme équivalente lors de la caractérisation des causes d'accidents et lors des audits sur les vols commerciaux. C'est donc cette décomposition que nous utilisons ici pour définir les objectifs à atteindre dans l'amélioration de la sécurité du pilotage à l'horizon 2050.

Incidence des performances opérationnelles du pilotage sur les causes d'accidents mortels

Les données statistiques utilisées ici sont tirées du document en (Réf 2) *Civil Aviation Authority 2013* CAP 1036 Global fatal Accident 2002 to 2011 (avions commerciaux de types : jets et turbopropulseurs de plus de 5,7 t). Le nombre annuel de vols est d'environ 32 $*10^6$ sur la période 2002 à 2011 avec en moyenne 20,5 accidents mortels/an.

La durée moyenne des vols est 1,7 h (plus précisément 1,96 h pour les jets et 0,88 h pour les turbopropulseurs). Le nombre moyen d'accidents mortels constatés est de 0,37 $x10^{-6}$ par heure de vol (plus précisément, le taux moyen d'accidents mortels par heure de vol pour les jets est de 0,19 $x10^{-6}$ et pour les turbopropulseurs de 1,8 $x10^{-6}$). Il est de ~ 0,09 $x10^{-6}$ par heure de vol pour les opérateurs rattachés à l'Amérique du nord ou aux pays de l'Union européenne.

Les rapports CAP caractérisent les différents types de facteurs potentiels d'accidents dans le domaine du pilotage. Le rapport CAP 1036 analyse pour chaque accident mortel survenu au cours de la période 2002-2011 la présence, ou non, de chacun de ces facteurs parmi les causes principales de l'accident. Il tente ensuite d'identifier lorsque cela est possible si l'une de ces causes principales peut être considérée (de façon exhaustive) comme la source primaire de l'accident considéré. Voir Table 1 ci-après.

***Note relative à la terminologie utilisée dans la table 1** :*

- *"Non Maîtrise du Pilotage" correspond généralement à des événements au cours desquels l'avion peut être encore piloté (incluant la panne d'un moteur à bord d'un bimoteur), avec cependant une mauvaise gestion des ressources de pilotage par l'équipage ou une maîtrise insuffisante du pilotage manuel conduisant à un accident catastrophique.*

- *"Omission ou action inappropriée" correspond généralement à des cas où l'équipage (1) continue la descente en dessous de l'altitude de décision ou des altitudes minimum de sécurité sans référence visuelle, (2) ou continue la descente en cas d'approche non nominale, (3) ou omet d'entrer la configuration correcte de l'avion avant le décollage.*

Table 1 : Sources principales des accidents mortels impliquant l'équipage dans la période 2002-2011. *Moyenne mondiale* et (moyenne pour les opérateurs US)

Causes d'accidents	Principales %		Principales Primaires %	
	Jets	Jets & Turbops	Jets	Jets & Turbops
Non Maîtrise du Pilotage *Par exemple : non-récupération de sous/sur vitesse, d'une mauvaise assiette et/ou d'un mauvais contrôle directionnel*	*27*	*28* (34)	*16*	*14* (18)
Omission ou action inappropriée ex. *Non*-respect des *Procédures Opérationnelles Standardisées tel que poursuite de la descente hors procédure.*	*40*	*28* (36)	*19*	*12* (11)
Perte de repère concernant la position de l'avion *(Principalement : perte de repère de position par rapport au terrain aux obstacles ou aux surfaces liquides conduisant à une collision, sans perte de contrôle de l'avion.*	*25*	*22* (23)	*8*	*10* (14)
Mauvaise appréciation de la situation, manque de professionnalisme	*29*	*24* (30)	*9*	*8* (9)
Utilisation insuffisante des techniques, méthodes et outils *Mauvaise utilisation des techniques et des outils de management des ressources de l'équipage (validations croisées/coordination)*	*33*	*21*		*2*
Non-respect délibéré des procédures		*2*		*2*
Total	*(*)*	*(*)*	*52*	*48* (52)

(*) Total potentiellement supérieur à 100% parce que plusieurs causes principales peuvent être identifiées pour le même accident. Les défaillances du pilotage sont sources principales (non spécifiquement primaires) dans ~ 66% des accidents mortels.

On peut remarquer que les pourcentages indiqués dans la table 1 respectivement pour l'ensemble des opérateurs au niveau mondial et pour ceux rattachés à l'Amérique du nord sont assez similaires, et ce, bien que les taux d'accidents mortels soient très différents.

On peut voir par ailleurs dans les données du rapport CAP 1036, que les statistiques d'accidents établies pour l'UE sont proches de celles de l'Amérique du nord**.**

Performances opérationnelles des pilotes et copilotes

Les données relevées ici ont pour but d'illustrer la possibilité de mesurer au cours des vols (même en l'absence de tout accident ou incident grave pour la sécurité) certaines performances de pilotage au niveau " amont" (action des pilotes vers la machine) et à des niveaux "intermédiaires" (après des retours de la machine vers les pilotes).

Ces données sont tirées du document (Réf 1): *Matthew J W Thomas University of South Australia Adelaide, Australia "Improving organisational safety through the integrated evaluation of operational and training performance: an adaptation of the Line Operations Safety Audit (LOSA) methodology".*

Les relevés ont été fait avec le concours d'une compagnie aérienne équipée de Boeing 737-300 et 400 pour des vols court-courriers et d'Airbus A330-300 pour des vols moyen-courriers, avec l'objectif d'étudier les voies potentielles d'amélioration de la qualité de formation des équipages sur simulateur.

Le comportement des pilotes observé pendant 3 mois au cours de 323 vols opérationnels met plus précisément en évidence trois types de performances :

- gestion des erreurs résultant des actions initiales de l'équipage lui-même,

- gestion des menaces externes au cockpit (conditions météorologiques ou aéroportuaires défavorables, panne d'un équipement de l'avion, pression opérationnelle, ...)

- performance "non-technique" de l'équipage : communication, vigilance et connaissance de la situation, organisation des tâches, et prise de décision

Note : On retient aussi que la comparaison faite par Matthew J W Thomas, entre les performances des pilotes en vol opérationnel et sur simulateur, illustre bien la variabilité des performances humaines

selon le contexte (présence d'observateurs scrutateurs lors des séances sur simulateur par exemple), l'enchaînement et la fréquence des événements au cours d'un vol et donc aussi le niveau de récurrence de tâches.

Gestion des erreurs résultant des actions de l'équipage

Les erreurs sont définies comme des actions ou inactions de l'équipage qui conduisent à une déviation par rapport à son attente ou à celle des organismes intervenant dans le management du vol.

Comme dans toute autre opération de systèmes complexes avec intervention humaine en temps réel, les erreurs individuelles de pilotage ne peuvent pas être complètement évitées. Leur gestion est donc l'un des éléments importants de la performance de l'équipage.

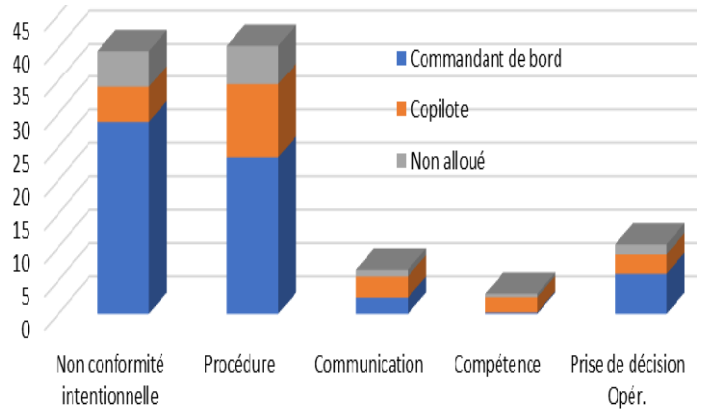
Les erreurs initiales sont classées en 5 catégories principales comme indiqué dans la table 2 ci-dessous (tirées de la Réf 1).

La Fig.1 donne leur fréquence d'apparition initiale selon leur origine. Au total 508 erreurs ont été observées pendant les 323 vols opérationnels. Les erreurs sont allouées spécifiquement au "Commandant de bord" ou au "Copilote" ; elles sont "non allouées" lorsqu'elles résultent de l'action ou inaction des deux pilotes avec une responsabilité partagée.

Table 2 Types d'erreurs pendant les opérations de vol

Non-Conformité Intentionnelle	*Violation consciente des POS (Procédures Opérationnelles Standardisées) ou des réglementations, telles que la non vérification systématique des éléments de la Liste de Contrôle avant le décollage.*
Procédure	*Déviation non-intentionnelle lors de l'exécution des POS ou du suivi des règles, par ex. entrées incorrectes de données pour le mode de navigation*
Communication	*Interprétation ou transmission incorrectes d'information, telles que relecture incorrecte pour l'ATC*
Compétence	*Manque de connaissances ou de compétences, telle que choix d'une vitesse inadaptée en approche finale*
Prise de décision Opérationnelle	*Décisions discrétionnaires non dictées par des règlements ou des procédures, telles que celles relatives au contournement ou non d'une zone orageuse*

Figure 1 Taux d'apparition de chaque type d'erreur (en % des erreurs totales pendant les opérations de vol)



Note : Une collecte de données dans le cadre LOSA effectuée par l'Université du Texas de 1997 à 1998 sur 314 vols donne une répartition en pourcentage du nombre d'erreurs par type, raisonnablement proche de la répartition des types d'erreurs ci-dessus : Non-Conformité Intentionnelle (54%) ; Procédure (29%) ; Communications (6%) ; Compétence (5%) ; et Prise de décision opérationnelle (6%)

Matthew J W Thomas présente différentes statistiques relatives aux performances :

1 *Génération d'erreurs initiales* par chacun des membres d'équipage ou conjointement, au cours des 323 vols : La moyenne d'erreur est de 1,57 par vol. Plus de 60% des erreurs initiales sont commises par le

commandant de bord. Parmi ces erreurs près de 50 % sont des défauts de respect aux règles ou aux procédures d'opération standard.

2 *Détection :* Près de 45% des erreurs initiales ne sont détectées ni par l'équipage, ni par les services du contrôle aérien ou tout autre support ; La détection d'erreurs conduit parfois à des erreurs additionnelles et donc à un nouveau cycle de détection/correction.

La capacité de chacun des membres d'équipage est beaucoup plus grande à détecter les erreurs de l'autre que les siennes propres (environ 40% contre 7%) ;

3 Correction des erreurs initiales et situation résultante : Près de 63% des erreurs initiales ne reçoivent pas de réponse. Si l'on considère les erreurs commises par le commandant, ce taux est de 67,6%. Les erreurs détectées sont corrigées ou aggravées.

4 *Conséquence des erreurs non corrigées, corrigées ou aggravées :* Près de 50% des erreurs sont sans conséquence ; 20 % résultent en un état non désiré de l'avion, en majorité celles commises initialement par le commandant de bord ; 30% résultent en des erreurs additionnelles qui peuvent donner lieu à nouveau à une correction. Après le deuxième cycle de correction, environ encore 1/3 des erreurs initiales résultent en un état non désiré de l'avion, donnant lieu à de nouvelles corrections.

Note : En comparaison, au cours des séances sur simulateur les procédures d'opération standard sont parfaitement respectées par le commandant, toutes les erreurs sont détectées à 100% et seulement 15% ne sont pas corrigées.

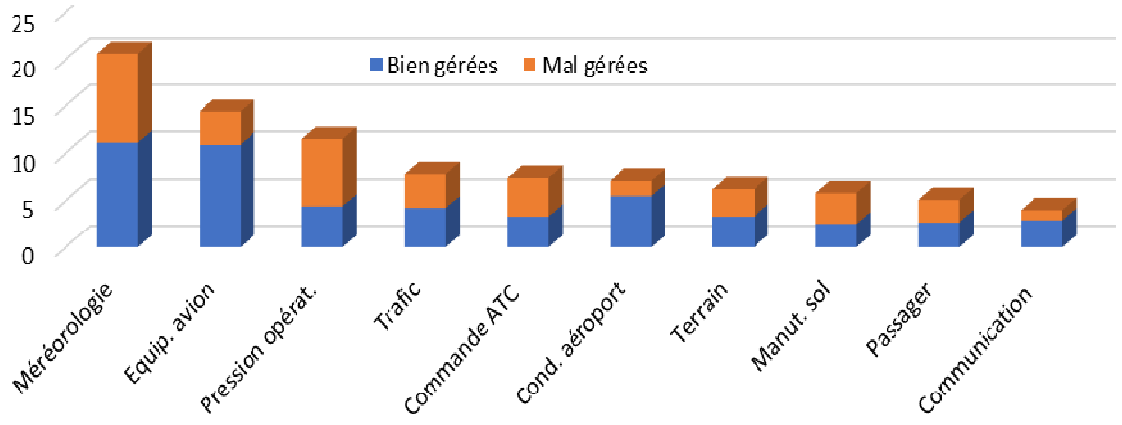
Gestion des menaces externes au cockpit

La notion de "menace" doit être comprise ici comme une situation à risque que les automatismes embarqués actuellement ne pourraient pas gérer avec un bon niveau de sécurité et demandant en conséquence une attention particulière de l'équipage et des prises de décision le plus souvent immédiates. Les situations à risque sont parfois générées par les automatismes eux-mêmes, mais les statistiques manquent pour établir les liens de causes à effets.

La fréquence moyenne, observée par Matthew J W Thomas, d'occurrence de menaces à la sécurité des vols "externes au cockpit" est de 1,4 menace par vol. La Figure 2 tirée de la Réf 1 montre les 10 types de menaces les plus fréquentes rencontrées au cours des vols opérationnels, et qui représentent 90% de toutes les menaces rencontrées.

La qualité de gestion par les équipages a été analysée pour chaque type de" menaces"

Figure 2 : Distribution et gestion des menaces externes au cockpit pendant les opérations de vol (% du nombre total



La conclusion de l'enquête menée par Matthew J W Thomas est qu'au global, pour les vols observés, les "menaces externes" ont été bien "managées" dans 58% des cas tandis que dans les 42% résiduels, la sécurité des vols aurait pu être mise en cause.

En comparaison, au cours des séances sur simulateur, les menaces extérieures ont été bien managées dans 83% des cas. Il est noté cependant que les types de menaces (et leurs fréquences) représentées dans le simulateur différaient sensiblement de celles rencontrées sur les vols opérationnels.

Performance "non-technique" de l'équipage

La performance de l'équipage pour l'organisation des tâches, la mise en œuvre, l'échange d'informations et le suivi de la situation a été évaluée à un niveau "moyen".

Relation entre les types de performances mesurées en vol et les causes d'accidents

D'une façon générale, les facteurs potentiels d'accidents dans le domaine du pilotage retenus dans le rapport CAP (Réf 2) peuvent être mis en correspondance directe avec les différents types de performances « amont » mesurables au cours de vols.

Le modèle de gestion des erreurs résultant des actions de l'équipage établi par Robert L. Helmreich, James R. Klinect, & John A. Wilhelm (Réf 5) « Models of threat, error and CRM Flight Operations » montre comment les erreurs peuvent résulter, ou non, en des incidents ou accidents. Le rapport de la "Flight Safety Foundation: (Réf 6) A practical guide for improving flight path monitoring" montre aussi la corrélation positive entre la faiblesse de la surveillance des données du vol et le nombre d'états non désirés de l'avion et reconnaît cette faiblesse comme un facteur contributif d'accidents.

Axes et objectifs d'amélioration de la sécurité du pilotage avec des équipages de 2 pilotes à bord, à l'horizon 2050

On a identifié dans le Livret 1 un objectif d'amélioration dans un rapport typiquement de 3 pour le poste " pilotage", par rapport à la situation d'aujourd'hui, pour les opérateurs basés en Amérique du Nord ou dans les pays de l'UE.

On a considéré aussi que les améliorations dans les autres régions du Monde viendraient, en moyenne, du remplacement progressif des avions d'anciennes générations et du transfert de l'expérience acquise dans les pays avec un haut niveau de sécurité du transport aérien aujourd'hui (avec les adaptations nécessaires pour tenir compte de la culture propre à chacun des pays).

On tente donc d'identifier sommairement dans ce chapitre les axes de progrès technologiques et opérationnels en regard de chacun des facteurs principaux d'accidents ainsi que des "facteurs circonstanciels aggravants" dans le domaine du pilotage pour les opérateurs basés en Amérique du Nord et dans l'UE.

On définit ensuite, sur la base d'un "jugement d'ingénieur", un ensemble d'objectifs quantitatifs d'amélioration au niveau des causes primaires d'accidents mortels mettant en relation les perspectives de progrès technologiques et les bénéfices attendus des mises en application.

De façon similaire aux approches utilisées pour la *Détection*, l'*Isolation* et la *Reconfiguration* en cas de pannes, l'amélioration de la sécurité des vols doit être poursuivie à différents niveaux :

- Performance des actions et décisions en « amont » relatives notamment au management initial par les pilotes des erreurs et des menaces,
- Performances de l'ensemble « Homme(s)-Machine » au niveau des fonctions et protections à des niveaux intermédiaires (détection d'erreurs ou de risques par l'ensemble Homme-Machine),

- Protections au niveau global par la machine telles que la protection enveloppe du vol sur les jets de dernière génération.

Principales opportunités d'amélioration de la sécurité du pilotage par fonction

La Figure 3 donne un aperçu global des opportunités d'amélioration par fonction, incluant :

- La détection (à l'aide de capteurs embarqués dans l'avion) et la collecte de données venant des capteurs embarqués et de sources externes via les télécommunications (par exemple : données météorologiques, position d'autres avions, ...)

- Le filtrage et la fusion des données (estimation de l'état de l'avion et de sa dynamique : attitude et trajectoire) et la perception (relative au contexte et à l'environnement)

- L'acquisition de "consignes" ou de contraintes venant de l'extérieur de l'avion, par exemple via les communications avec les services de Management du Trafic Aérien (ATM) ou avec les Centres de Contrôle Opérationnel des compagnies (CCO)

- L'interfaçage données machine-pilotes

- L'élaboration de commandes pour le contrôle instantané de l'avion.

- L'élaboration d'options et la prise de décision relatives notamment à la trajectoire

- L'action (mise en œuvre des commandes et des plans d'action)

- La surveillance de la sécurité du vol (y compris la cohérence des consignes avec la perception du contexte et de l'environnement), la surveillance de l'état de réalisation des fonctions (détection de pannes ou d'anomalies, analyse d'évolution de paramètres critiques, ...) et la reconfiguration locale ou globale, avec potentiellement changement de trajectoire.

Les progrès dans les technologies de type "matériel et traitement de l'information" (ex. miniaturisation des capteurs et capacité de traitement numérique) peuvent être mis à profit pour "enrichir" les contributions des équipements de l'avion aux fonctions de détection, de filtrage et de fusion de données, de perception, de planification et d'optimisation, et enfin de surveillance.

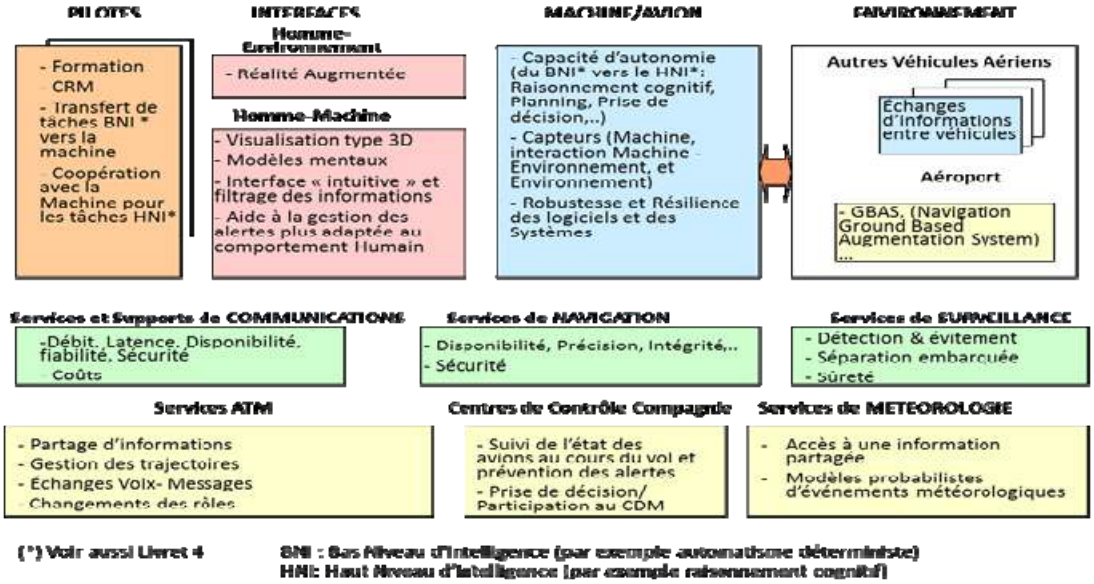
L'utilisation accrue des moyens de télécommunications pour des échanges machine-machine en réseaux entre les avions et les stations sol permettra aussi de synthétiser et de densifier l'information disponible à bord pour la connaissance de l'environnement (données de météorologie, position et trajectoire des autres avions, environnement aéroportuaire, ...).

Les progrès technologiques dans l'interface de l'Homme vers la machine (modes de saisie manuelle de données, reconnaissance vocale, suivi du regard, capture d'autres signaux faciaux,..), et de la machine vers l'Homme (aide à la sélection de l'information, "contextualisation", modes de représentations spatiales, réalité augmentée, modes d'interrogation et d'itération, ..) devraient aider les pilotes pour le maintien de leur connaissance et de leur compréhension de la situation, ainsi que pour les saisies de données et de consignes en les rendant plus naturelles, plus rapides et plus sûres. La reconnaissance vocale pourra être mise à profit aussi pour sécuriser les échanges entre les équipages et les services sol (Management du Trafic Aérien notamment) en établissant une transmission vocale et une transmission de données en parallèle.

L'augmentation des capacités de la machine pourra être mise à profit pour donner de plus en plus aux pilotes un rôle de *surveillance* (avec compréhension globale du contexte et du comportement de l'avion), de *gestion* et de *prise de décisions* sur la base des options élaborées par la machine et/ou par eux-mêmes. L'Homme et la machine doivent avoir des implications partiellement redondantes dans la perception et complémentaires dans l'élaboration de plans d'actions. La qualité de l'interface Homme- machine relativement à la simplicité et à la rapidité d'échanges d'informations à différents niveaux est primordiale pour l'efficacité et la sécurité du système global.

Il faudra s'attacher aussi à maintenir la vigilance de l'équipage en lui laissant des activités valorisantes.

Figure 3 : Opportunités d'amélioration de la fiabilité du pilotage par fonction



Principales opportunités d'amélioration du pilotage en regard des causes d'accidents mortels

Les voies d'améliorations ainsi que les opportunités technologiques présentes ou futures pour leurs mises en œuvre sont indiquées brièvement pour chacune des principales sources d'accidents et pour les "facteurs circonstanciels".

Améliorations relatives aux sources principales d'accidents

- "Maîtrise du Pilotage" et "Omissions ou actions inappropriées"

Voies d'amélioration	*Moyens d'amélioration*
- Réserver principalement le rôle des pilotes aux tâches de (1) management : définition des objectifs et des stratégies, choix de la trajectoire en relation directe avec la sécurité, (2) communication (avec l'ATC notamment) et de (3) "surveillance" : connaissance de l'environnement, suivi du contexte et des ressources, suivi général de l'évolution du vol.	*. Pilotage de plus en plus autonome.* *. Adaptation de la formation des pilotes en conséquence.*
- Renforcer le rôle de la machine (à bord et au sol) pour les tâches d'optimisation (calcul de trajectoires, utilisation des ressources dans le cadre imposé par le pilote), et de contrôle de trajectoire (application des équations de la mécanique du vol)	*. Automatismes* *. Calculateurs, liaisons de données et logiciels*
- Renforcer la coopération étroite entre l'Homme et la machine pour certaines tâches cognitives (exploration, planification, ...)	*. Agents cognitifs et interface Homme-machine*
- Renforcer l'assistance de la machine aux actions du pilote (détection d'erreurs, respect des POS, ...)	*. Système informatique et logiciels robustes/résilients*
- Faciliter la reprise en main en urgence	*. Automatismes résiduels* *. Interface Homme-machine*

- "Prise de décision opérationnelle "

- Renforcer la préparation des pilotes à la "prise de décision" - Renforcer la résistance au stress, la maîtrise de soi	*. Formation et entraînement* *. Systèmes informatiques pour l'aide à la visualisation synthétique de l'environnement, du contexte et des ressources*
- Compléter l'expertise dans le "CDM" "Prise de décision collaboratrice "/ assistance par d'autres sources d'expertises (depuis le sol notamment) pour certaines décisions (stratégie de contournement d'une zone orageuse par exemple)	*. Communication* *. Techniques de CDM (pilotes, ATC, CCO, Aéroport, ...)*

- "Perte de repère concernant la position de l'avion"

- Améliorer la qualité des informations et de leur présentation aux pilotes	*. Qualité des interfaces Homme-Machine* *. Nouveaux capteurs et informations additionnelles*
- Renforcer la qualité (vis à vis des retards, échos, bruits de fond) et la disponibilité des liaisons de télécommunications	*. Protocoles de communications aéronautiques,* *. Cheminement des communications, ...* *. Liens multiples redondants*
- Renforcer la compréhension des échanges (avec l'ATC notamment)	*. Transmission en parallèle : voix et message sur des liens de télécommunications distincts. (Reconnaissance vocale du locuteur à la source ...)*

- "Utilisation des techniques, méthodes & outils", "Non-respect délibéré des procédures"

- Améliorer les échanges internes au cockpit et avec le sol, Interfaçage intuitif, synthèse des paramètres pertinents	*. Formalisation de modèles mentaux pour les systèmes techniques, adaptés aux échanges entre les membres d'équipage et avec la machine* *. Interface "Homme-machine"* *. Agents cognitifs*
- Améliorer l'efficacité et la sûreté d'emploi des systèmes informatiques et des logiciels	*. Robustesse/résilience des systèmes informatiques et des logiciels*

Améliorations relatives aux "facteurs circonstanciels" aggravant les risques d'accidents

- "Faible visibilité ou manque de référence visuelle externe"

- Améliorer les informations visuelles	*. Utilisation de la réalité virtuelle pour la vision renforcée*

- "Météorologie"

- Echanges plus fréquents d'informations synthétiques et adaptées aux besoins immédiats des pilotes entre l'avion et le sol (voire entre les avions dans une même zone géographique). - Meilleure interprétation des données météorologiques	*. Télécommunications et présentations synthétiques d'informations* *. Application de Techniques de CDM bord sol*

- "Allocation du Temps pour exécuter les tâches"

- Aide informatique y compris cognitive	*. Transfert de tâches vers la machine (autonomie augmentée), et vers le sol à l'initiative des pilotes (tout en laissant aux pilotes la possibilité d'effectuer des tâches de "pilotage manuel" pour entretenir leurs compétences, lorsqu'ils ont du temps disponible.*
- Simplification des présentations des situations imprévues et des procédures impliquées dans la récupération	*. Rapidité et efficacité des échanges Homme-machine,*

Objectifs quantitatifs de réduction des causes primaires d'accidents mortels

L'amélioration doit résulter d'une réduction simultanée des facteurs principaux d'accidents et des facteurs circonstanciels aggravant les risques.

Un premier niveau d'amélioration apparait naturellement avec le remplacement progressif des avions anciens par des avions de dernière ou de future génération. Une évaluation quantitative de ce premier niveau d'amélioration peut être faite pour les jets de conception occidentale à l'aide des données Airbus (Réf 8).

Evaluation quantitative des améliorations du pilotage obtenues avec les avions de dernière génération

Le taux moyen d'accidents mortels au niveau mondial sur la dernière décennie, de 0,3 par M de vols pour la flotte actuelle de jets de conception occidentale, est seulement de 0,11 par M de vols pour les avions de quatrième génération dans l'état neuf ou récent d'aujourd'hui (données Airbus Réf 8). Le nombre d'accidents mortels impliquant l'équipage qui est de l'ordre de $0{,}2 * 10^{-6}$ en moyenne par vol avec la flotte actuelle sur la période 2002 à 2011 n'est que de $0{,}1 * 10^{-6}$ par vol avec les seuls jets de quatrième génération.

Airbus (Réf 8) donne plus précisément, pour les jets de conception occidentale, les facteurs de réduction des taux d'accidents par type :

- facteurs ~1,4 pour "CFIT" *Perte de repère de position conduisant à une collision avec le terrain un obstacle ou l'eau*,

- facteur ~5 ~pour *"LOC-I " Perte de contrôle de l'avion pendant le vol ne faisant pas suite à une défaillance ou à un mauvais fonctionnement du système* et,

- facteur ~1,4 pour "RE" *Sortie de piste*)

La traduction des réductions des "taux d'accidents par type" constatées pour les jets de dernière génération en réductions potentielles des sources principales et primaires des taux d'accidents par le remplacement progressif des avions anciens par des avions de dernière ou de future génération pour l'ensemble jets et turbopropulseurs est faite ici de façon approximative sur la base des sources disponibles.

La Table 3 établit à partir de données CAP (Réf 2), une première relation entre causes principales et types d'accidents pour l'ensemble jets et turbopropulseurs de plus de 5,7 t pour la période 2002-2011.

Table 3 : Relations entre les causes principales et les trois types principaux d'accidents *(en % d'apparition de chaque cause comme « cause principale d'accident » dans chaque « type » d'accident)*

Causes d'accidents	CFIT	LOC	RE
Non Maîtrise du Pilotage		50 %	43 %
Omission ou action inappropriée	45 %	38 %	31 %
Perte de repère concernant la position spatiale de l'avion	91 %		
Mauvaise appréciation de la situation, manque de professionnalisme	34 %	31 %	43 %
Utilisation insuffisante des techniques, méthodes et outils	30 %	33 %	
Non-respect délibéré des procédures	19 %		23 %

A l'aide de cette Table et sur la base d'un jugement d'ingénieur, l'impact des améliorations, notamment pour les accidents de type LOC-I, constatées par Airbus (Réf 8) pour les jets de dernière génération peut être traduit en un niveau indicatif des réductions de chacune des causes primaires d'accidents pour l'ensemble des avions de dernière génération incluant jets et turbopropulseurs de plus de 5,7 tonnes. Ces réductions sont indiquées sur la Figure 4.

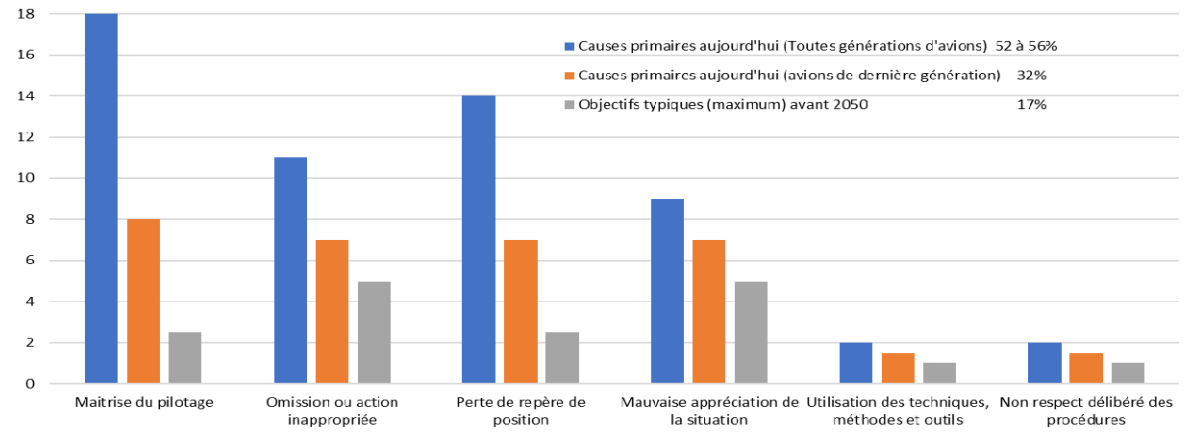
Objectifs typiques de réduction d'ici 2050 des causes primaires d'accidents mortels (Amérique du Nord et UE)

A partir de l'objectif d'amélioration de la sécurité du pilotage dans un rapport 3 pour les opérateurs rattachés à l'Amérique du Nord et l'UE, on tente ici de définir des objectifs spécifiques pour les améliorations relatives à chacune des sources primaires d'accidents mortels.

La Figure 4 rappelle les causes primaires d'accidents dans la période 2002-2011 (colonnes de gauche) déjà indiquées dans la table 1, indique la réduction attendue de ces causes primaires avec des avions de dernière génération (colonnes centrales) et présente des objectifs d'amélioration, définis sur la base d'un "jugement d'ingénieur", d'ici à 2050 (colonnes de droite) en tenant compte de la nature des facteurs ainsi que des perspectives offertes par les développements techniques et technologiques en cours.

En particulier les tâches qui font appel au plus haut niveau de raisonnements cognitifs resteront le plus souvent celles de l'équipage. Elles bénéficient donc d'une perspective d'amélioration de sécurité liée seulement aux améliorations de la "perception" des situations. C'est pourquoi les objectifs d'amélioration portant sur les facteurs : "Mauvaise appréciation de la situation, manque de professionnalisme″ *et sur* ″Omissions ou actions inappropriées″ sont les plus limités. Cette limitation permet d'ailleurs d'anticiper une augmentation de certaines sources d'erreurs dues à l'augmentation des automatismes en général.

Figure 4 : Objectifs typiques de réduction d'ici 2050 des sources primaires d'accidents mortels en Amérique du Nord et en EU (en % du taux d'accidents mortels d'aujourd'hui)



Evolution vers le pilotage avec un seul pilote à bord : Exigences relatives à l'assistance depuis le sol

La recherche de sources potentielles d'économie conduit à envisager à l'horizon de quelques décennies, une évolution vers des équipages d'un seul pilote à bord pour les vols courts et moyens courriers, et à une réduction de 2 à 1 du nombre de pilotes en opération au cours des phases de croisière pour les vols longs courriers ce qui, dans ce dernier cas, permettrait de satisfaire plus facilement les contraintes de temps de travail avec des équipages réduits à bord.

Afin de respecter les objectifs de sécurité des vols, des mesures spécifiques devraient être prises pour limiter d'une part les impacts des défaillances physiologiques (et mentales) du pilote en fonction et d'autre part les réductions de performance (hors défaillance physiologique) d'un équipage constitué d'un seul pilote en fonction à bord au lieu de deux.

On étudie plus précisément dans ce chapitre le cas des vols avec un seul pilote effectivement à bord de l'avion (cas des courts et moyens courriers), qui est le plus dimensionnant. On abordera successivement les points suivants :

- Données statistiques relatives aux défaillances physiologiques des pilotes et performances typiques atteignables pour leurs détections.

- Points bloquants, (y compris la diminution des performances de pilotage, hors défaillance physiologique, en passant d'un équipage de deux à un seul pilote), vis à vis de la sécurité pour la mise en œuvre d'ici à 2050 du pilotage avec un seul pilote à bord et sans support sol.

- Exigences relatives au support sol nécessaire pour la mise en œuvre initiale (*) du pilotage avec un seul pilote à bord. *(*) Diverses hypothèses très prudentes servent de base à l'évaluation de ces exigences, notamment sur le niveau moyen de pertes de performance des pilotes atteints de défaillances physiologiques non détectées et sur le niveau de performance du pilotage autonome atteignable d'ici une à deux décennies.*

Afin de faciliter la présentation des analyses dans ce chapitre, le taux d'apparition des "menaces externes au cockpit" est supposé uniforme au cours du vol.

Dans la 2éme partie du Livret : « Illustration de l'assistance sol dans le cas d'un seul pilote à bord » on tiendra compte des différences très importantes de ce taux de menaces entre les différentes phases du vol, pour définir des besoins réalistes d'assistance sol.

Défaillances physiologiques des pilotes et performances typiques atteignables pour leur détection

Les données disponibles relatives aux modes d'apparition et aux manifestations des défaillances physiologiques des pilotes sont insuffisantes pour permettre une caractérisation statistique sérieuse. Néanmoins les ordres de grandeur présentés ci-après permettent d'effectuer une première étape de réflexion prospective.

Caractérisation des défaillances physiologiques observées au cours de vols commerciaux

Les données utilisées dans ce chapitre sont librement dérivées du document de Charles A. DeJohn, Alex M. Wolbrink, Julie G. Larcher en (Réf 4) : "Pilots physiological deficiencies: In flight Medical Incapacitation and impairement of US Airline pilots 1993 to 1998".

Les défaillances physiologiques d'un pilote sont classées par les auteurs en pertes totales ("incapacitation"*)* ou partielles (*"impairment")* de capacité. Il y a perte partielle de capacité lorsque le pilote peut encore effectuer - bien qu'avec des performances dégradées - des tâches en nombre et en nature limités (par exemple : lecture des "listes de contrôle", radiocommunications, ...).

Sur un ensemble de vols US étudiés de 1993 à 1998 et correspondant à près de 86 M heures de vol, 39 pertes totales et 11 pertes partielles de capacité ont fait l'objet de rapports.

Le taux de perte totale de capacité a donc été de 0.45 par M d'heures de vol. Celui de perte partielle de capacité déclarée a été de 0,13 par M d'heures de vol. Le nombre plus limité de pertes partielles que de pertes totales de capacité correspond sans doute au souhait de nombreux pilotes d'éviter autant que possible le signalement de ce type de malaise.

On considérera dans cette note, pour la population mondiale des pilotes sur des vols commerciaux, un nombre de pertes partielles de capacité équivalent à celui des pertes totales soit un taux global de défaillances physiologiques de $\sim 10^{-6}$ par h de vol.

Les pertes partielles de capacité des pilotes peuvent prendre des formes diverses. Celles relatées en Réf 4 incluent de simples cas de fatigue due en partie à la durée anormale du poste, des événements accidentels dus à l'environnement (aveuglement par laser, empoisonnement par du dioxyde de carbone), ou à des conditions particulières liées au pilote et à l'environnement (illusions visuelles), et enfin des malaises sans perte de connaissance ("douleur vagale", douleur thoracique rétro sternale, problèmes respiratoires, déshydratation gastro-intestinale).

Paradoxalement (en apparence), au cours des vols étudiés ce sont les pertes partielles de capacité qui ont généré les deux accidents (non mortels) observés. L'interprétation suggérée est que ces types de malaises apparaissent souvent de façon moins évidente et sont donc moins détectables par l'autre pilote ou par le personnel de bord, que les pertes totales de capacité.

Il semble ainsi que le déni ou la volonté du pilote de cacher autant que possible l'apparition d'une perte de capacité se traduit par un accroissement de risque, variable selon le type et la durée de malaise ou de fatigue.

A contrario la possibilité et la volonté du pilote de signaler l'apparition possible d'un malaise peut limiter le risque, si la responsabilité du vol peut être transférée dans des conditions de sécurité satisfaisantes et avec un délai acceptable à un autre pilote ou à la machine.

L'analyse des 50 rapports de défaillances physiologiques reproduits dans le document (Réf 4) permet d'effectuer une classification et une quantification préliminaires des différents types de manifestations des défaillances.

On retiendra pour notre réflexion, (après « libre » réinterprétation des données) les types de défaillances et les probabilités associées comme suit :

. Taux de perte partielle ou globale de capacité (*)

- perte totale de capacité d'un membre d'équipage (pilote ou copilote) : $0,5 \times 10^{-6}$/h de vol.
- perte partielle de capacité justifiant ou non la prise de responsabilité du pilotage par un autre pilote, à bord ou au sol : $0,5 \times 10^{-6}$ / h de vol.

. Manifestation de la perte totale de capacité (**) (taux $0,5 \times 10^{-6}$ / h de vol) :

- probabilité qu'une alerte puisse être donnée par le pilote concerné : 60%
- probabilité que le pilote concerné cesse toute activité sans préavis : 40%

. **Manifestation et gravité de la perte partielle de capacité** (taux $0,5 \times 10^{-6}$ / h de vol) :

- probabilité qu'une alerte soit donnée par le pilote concerné justifiant un transfert de responsabilité du pilotage *(perte partielle sévère de capacité déclarée par le pilote)* : 30%
- probabilité qu'aucune alerte ne soit donnée par le pilote, mais que le niveau de perte partielle de capacité justifie néanmoins le transfert de responsabilité du pilotage *(perte partielle sévère de capacité non déclarée)* : 20% (***)
- probabilité qu'aucune alerte ne soit donnée par le pilote et que le niveau de perte partielle de capacité ne justifie que l'assistance d'un autre pilote (sans transfert de responsabilité) pour toute action de pilotage *(perte partielle légère de capacité)* : 50%

Notes :

(*) Les taux de pertes simultanées de capacité totale de plusieurs membres d'équipage (décompression de la cabine,…) ou partielle (empoisonnement par dioxyde de carbone, fatigue simultanée) telles qu'observées au cours des vols étudiées en Ref 4 ont été respectivement de : 10^{-8} et $2x10^{-8}$ / h de vol.

(**) les pilotes sujets à une perte totale de capacité ont eu dans 15% des cas une action involontaire sur les commandes de l'avion mettant le vol en danger.

(***) On fait ici l'hypothèse préliminaire, probablement pessimiste que le niveau moyen de gravité de la défaillance correspond à une incapacité à gérer les menaces externes sans accident mortel dans 1 cas sur 5.

Le problème de la reconnaissance d'une défaillance physiologique et de sa gravité par quelqu'un d'autre que le pilote concerné est évidemment beaucoup plus critique dans le cas du pilotage avec un seul pilote à bord que dans le cas d'un équipage avec deux pilotes à bord.

Charles A. DeJohn, Alex M. Wolbrink , Julie G. Larcher (Réf 4) présentent aussi l'histogramme des pertes de capacité observées selon la tranche d'âge des pilotes. Il apparaît que si l'on ne considère que les pilotes dans la tranche d'âge de 30 à 50 ans, la probabilité d'une perte totale de capacité est réduite d'environ 30%.

Le suivi médical à long terme des pilotes ne semblerait pas permettre de détecter de façon très significative les risques de défaillance physiologique. Mais ce point de vue soutenu par le monde anglo-saxon est contesté notamment par la France. (Voir Jean-Georges Mouchard Réf 11).

Le suivi de *l'état psychologique* des pilotes est lui-même particulièrement à l'ordre du jour depuis l'accident du vol "Germanwings" le 24 mars 2015. Il était déjà suggéré depuis longtemps, mais aucune décision formelle n'avait été prise, l'absence de critère fiable s'y opposant. La question des défaillances "psychologiques" (par opposition à physiologique) n'est pas abordée directement dans ce Livret. Cependant les fonctions à mettre en œuvre pour pallier aux conséquences des défaillances physiologiques partielles (par exemple : capacité de déni de l'autorité du pilote pour le pilotage de l'avion) devraient répondre au moins en partie aux problèmes posés par les cas de défaillances psychologiques.

On retiendra des rapports de défaillance présentés en (Réf 4) et de l'analyse faite par les auteurs (en pensant notamment au pilotage éventuel avec un seul pilote à bord pour des vols courts et moyens courriers) :

- que les actions préventives de sélection pour les vols avec un seul pilote à bord, basées sur le profil long terme (notamment : âge ou examen médical) des pilotes, pourraient réduire dans une mesure limitée le risque lié aux défaillances physiologiques,

- que l'observation de l'état physiologique du pilote juste avant le vol (fatigue, ...) devrait permettre aussi de mesurer, dans une certaine mesure, le niveau de risque.

- que la détection pendant le vol de certaines pertes partielles de capacité physiologique est paradoxalement beaucoup plus difficile que celle des pertes totales de capacité.

D'un point de vue quantitatif, on peut noter que le taux moyen des défaillances physiologiques totales des pilotes (~$0{,}5x10^{-6}$/ heure de vol) est, à lui seul, supérieur au taux moyen d'accidents mortels constaté au cours de la décennie 2002-2011 au niveau mondial (~$0{,}4\ x10^{-6}$ / heure de vol pour l'ensemble jets et

turbopropulseurs) et plus encore au taux moyen d'accident mortels constaté en Amérique du nord et dans les pays de l'Union Européenne (~0,1 x10^{-6} / h de vol). *Pour illustration : la durée cumulée des temps de vol avec des équipages de deux pilotes aujourd'hui, au cours desquels l'un des deux pilotes assure seul le pilotage de l'avion par suite de défaillance physiologique de l'autre pilote est en moyenne annuelle de quelques dizaines d'heures pour les avions de transports de passagers de type jets et turbopropulseurs de plus de 5,7 t.*

Le pilotage avec un seul pilote à bord imposerait donc la mise en œuvre d'une fonction de détection des défaillances physiologiques et, en cas de nécessité, d'une reprise du pilotage dans un "mode de sauvegarde", soit par un système autonome à bord, soit par un opérateur au sol. Compte tenu du faible nombre d'heures de vol concernées, le pilotage en mode de sauvegarde, si son initialisation est correctement assurée, pourrait tolérer des performances moindres que celles du pilotage en conditions nominales. L'objectif serait alors de terminer le vol dans les bonnes conditions de sécurité à la destination initialement prévue ou sur un site de déroutement choisi sur la base de critères visant à limiter les risques d'accidents tout en tenant compte d'un niveau probablement élevé d'urgence de soins pour le pilote.

Détection des défaillances physiologiques au cours des vols

Dans les cas où le pilote est en mesure de reconnaître et de déclarer sa propre défaillance physiologique, une alerte peut être envoyée sans délai vers le sol et un mode de sauvegarde avec pilotage autonome de l'avion peut être engagé par le pilote lui-même. Dans les autres cas, un système de détection doit être mis en œuvre. Les approches envisagées incluent :

- *des moyens automatiques* tels que : (1) La mesure de paramètres physiologiques, (2) L'observation optique et l'analyse automatique des variations de signatures comportementales, propres à chaque individu, (3) L'observation des actions et omissions dans l'interface avec la machine, (4) La comparaison de résultats de démarches cognitives du pilote avec des résultats élaborés par la machine à un certain niveau d'expertise,

- *des moyens humains* tels que : (5) L'observation visuelle directe (par le personnel de cabine) ou via la vidéo transmission, (6) l'analyse des échanges verbaux dans une phase de dialogue de niveau non expert (par exemple avec un des Membres du personnel en cabine), (7) l'analyse des échanges verbaux dans une phase de dialogue de niveau expert (donc nécessairement avec quelqu'un au sol)

Les moyens de détection ou de surveillance peuvent être mis en œuvre de façon continue ou "discrète" (échantillonnée ou opportuniste) selon qu'ils sont automatiques ou humains et selon qu'ils nécessitent ou non une coopération active du pilote.

Des moyens automatiques de types (1) à (4) complétés par des moyens humains de type (5) et (6) peuvent être mis en œuvre à bord des avions sans support sol. Cette mise en œuvre devrait pouvoir assurer la détection, sans délai significatif, de 100% des défaillances physiologiques totales des pilotes, permettant ainsi l'engagement automatique (avec infirmation possible par le pilote en cas de détection erronée) du mode de sauvegarde avec pilotage autonome.

Par contre la détection d'une défaillance physiologique partielle (sévère ou non) non reconnue par le pilote est beaucoup plus problématique, soit parce que cette défaillance peut échapper à un observateur non expert, soit parce que - hormis les cas vraiment exceptionnels de crise de démence par exemple - l'autorité du pilote ne devrait pas être contestée par les Membres du personnel de cabine ni, bien évidemment, par la machine. En l'absence d'un support sol ayant l'expertise pour déceler une perte de capacité physiologique et ayant l'autorité pour déclarer l'inaptitude éventuelle du pilote à bord, certaines défaillances physiologiques des pilotes pourraient donc conduire à des atteintes graves à la sécurité des vols.

Au bilan, en l'absence de support sol pour l'aide à la détection de défaillance physiologique :

- les pertes totales de capacité physiologique des pilotes pourraient donner lieu sans délai à une activation du mode de pilotage autonome (taux d'occurrence : 0,5 x10^{-6}/h de vol)

- les pertes partielles de capacité physiologique des pilotes pourraient donner lieu à :

. une activation du mode de pilotage autonome lorsqu'elles sont reconnues par le pilote (taux d'occurrence: 0,3 x 0,5 x10^{-6} / h de vol)

. la poursuite du vol en mode nominal avec un niveau de sécurité plus ou moins dégradé selon la sévérité de la défaillance physiologique en cas de déni de la part du pilote (taux d'occurrence: 0,2 x 0,5 x10^{-6} / h de vol pour les défaillances sévères et 0,5 x 0,5 x10^{-6} / h de vol pour les défaillances légères)

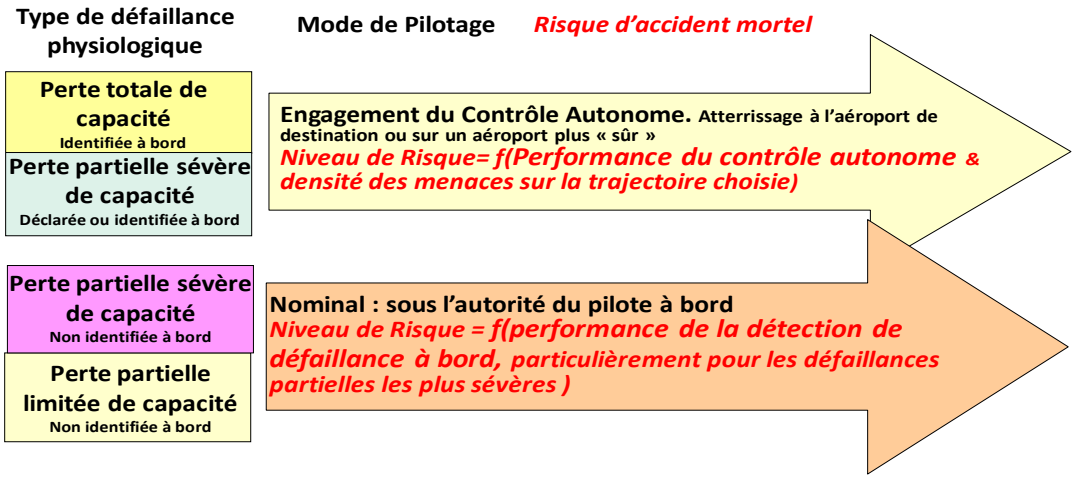
Dans les cas où un support sol est mis en œuvre pour aider à la détection des défaillances physiologiques, les défaillances partielles critiques devraient être détectées ou confirmées soit : après alerte déclenchée par la machine et évaluation par l'opérateur sol, soit lors d'échanges réguliers sol-bord (avec un retard potentiel fonction de l'intervalle entre deux échanges). Un passage préventif en mode de pilotage autonome peut-être envisagé dans certains cas.

Points bloquants dans le cas d'un pilotage avec un seul pilote à bord en l'absence de support sol spécifique (*)

(*) C'est à dire sans support sol autre que le celui requis dans le cas de pilotage avec 2 pilotes à bord

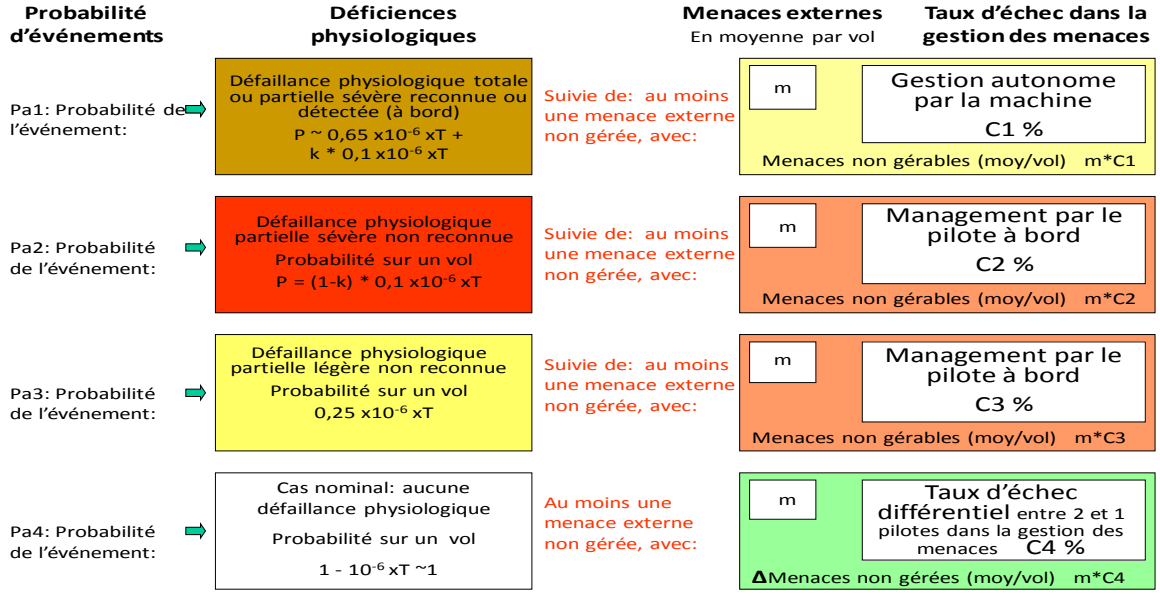
La séquence d'événements en cas de perte de capacité physiologique du pilote est illustrée en figure 5

Figure 5 : Séquence d'événement en cas de perte de capacité physiologique du pilote et en l'absence de support sol direct au pilotage



La probabilité additionnelle d'accidents mortels liée ou non aux défaillances physiologiques potentielles du pilote en passant d'un équipage de deux pilotes à un seul pilote à bord, sans support sol spécifique peut donc être représentée comme illustré sur la Figure 6.

Figure 6 Probabilité (additionnelle) d'accidents en passant de deux pilotes à un seul pilote en opération à bord et en l'absence de support sol : ΔP = Pa1 +Pa2 +Pa3 +Pa4, avec :



Dans le schéma ci-dessus :

- La durée du vol "T" est la moyenne des durées des vols court et moyen-courriers (donc inférieure à 1,7 h qui est la moyenne pour l'ensemble des vols court, moyen et long-courriers) et supérieure à 1 h qui est la moyenne pour les avions entre 5,7t et 27t). On prend ici un majorant, soit T= 1,7 h

- les "menaces externes au cockpit" sont des événements de durée limitée par rapport à la durée du vol qui mettent en jeu la sécurité s'ils ne sont pas gérés efficacement. Le nombre moyen de "menaces externes au cockpit" : "m" par vol est supposé proche de celui constaté sur les vols actuels. L'analyse quantitative retient comme hypothèse de départ la valeur proposée par Jean Pinet de "m =1", en moyenne par vol de 1,7h.

Dans le cas où une défaillance physiologique du pilote est détectée avec une alerte transmise automatiquement au sol, des mesures de sauvegarde externes à l'avion (par exemple : espacement exceptionnel des autres avions près de l'aéroport) ou interne à l'avion (changement automatique de plan de vol vers un aéroport de déroutement) peuvent permettre de diminuer sensiblement la valeur de m (ligne 1 de la Figure 6).

- On note Ci (i= 1 à 4) les taux d'échecs dans la gestion des menaces conduisant à un accident mortel. Le taux C1 est directement lié au niveau de performance du mode de sauvegarde avec pilotage autonome de l'avion. Les taux d'échecs de la gestion du pilotage (C2 et C3) sont directement liés au niveau de capacité physiologique correspondante du pilote. Le taux d'échec différentiel (C4) traduit la différence de performance, hors défaillance physiologique, entre le pilotage avec deux pilotes et un seul pilote en opération à bord.

- Les 4 événements combinés sont indépendants (et exclusifs). La probabilité additionnelle d'accidents en passant de deux à 1 seul pilote à bord est la somme des 4 probabilités d'événements combinés (ΔP = Pa1 +Pa2 +Pa3 +Pa4)

Il est impératif que le passage de deux à un seul pilote à bord n'ait pas d'impact notable sur le taux global d'accidents mortels. On traduira ici cet impératif par la condition théorique que ΔP reste inférieur typiquement au 1/20 du taux global d'accidents mortels. Compte tenu des objectifs de sûreté à l'horizon 2050 correspondants à moins de 0,05 accidents mortels par M h de vol en Amérique du Nord et en UE (Voir Objectifs Livret 1), ΔP devrait donc rester typiquement inférieur à 2,5 $x10^{-9}$ accidents mortels /h de vol. Pour la simplicité des analyses on considérera que chacun des 3 contributeurs suivants devra

résulter en moins de 10^{-9} accidents mortels /h de vol (ce qui est aussi généralement considérée comme la limite du discernable) :

- (1) défaillance physiologique totale ou partielle sévère reconnue, suivie d'un pilotage autonome jusqu'à destination ou jusqu'à un aéroport de détournement

- (2) pilotage avec performances dégradées dans le cas de perte sévère de capacité physiologique non reconnue par le pilote,

- (3) perte de performance (due à la réduction de l'équipage) dans la gestion du vol hors défaillance physiologique.

On négligera dans cette phase d'analyse le contributeur correspondant aux pertes légères de capacités physiologiques.

Les résultats chiffrés présentés ci-après ne doivent, bien évidemment, être considérés que comme des ordres de grandeur permettant d'orienter les réflexions prospectives.

Eléments de calcul des probabilités associées aux événements combinés incluant une défaillance physiologique du pilote

Avec l'hypothèse simplificatrice d'une distribution uniforme du taux λm d'apparition des menaces au cours d'un vol, on a donc : $\lambda m = m/T$

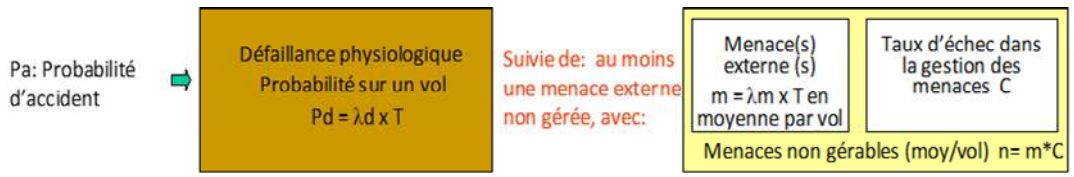
On admet aussi pour des raisons de simplicité d'analyse qu'une défaillance physiologique reste présente jusqu'à la fin du vol, après son apparition.

On veut calculer ici l'expression générale de la probabilité de l'événement combiné :

- apparition d'une défaillance physiologique du pilote

- suivie de l'apparition de (au moins) une menace à la sûreté du vol non gérable par le pilotage mis en œuvre après la défaillance du pilote (pilotage autonome ou par le pilote lui-même avec capacité physiologique réduite) (voir Figure 7).

Figure 7 Description de l'événement combiné considéré



La probabilité d'accident mortel par vol (Pa), liée au taux de défaillance physiologique du pilote (compte tenu du très faible taux de défaillance physiologique λd par h de vol) peut alors s'exprimer comme :

$$Pa = (\lambda d * T) * Pcm$$

avec Pcm = Probabilité conditionnelle qu'au moins une "menace non gérable par le pilotage" survienne pendant le temps de vol restant après l'apparition d'une défaillance physiologique du pilote.

Lorsque le nombre moyen de "menaces non gérables par le pilotage" par vol : n, avec ($n = \lambda m * T * C$) est très inférieur à 1, on montre que Pcm peut s'exprimer simplement par : $Pcm \sim \lambda m * T * C / 2$

On a alors : $Pa \sim (\lambda d * T) * n / 2$

Le taux moyen d'accidents sur le vol correspondant peut donc être exprimé comme :

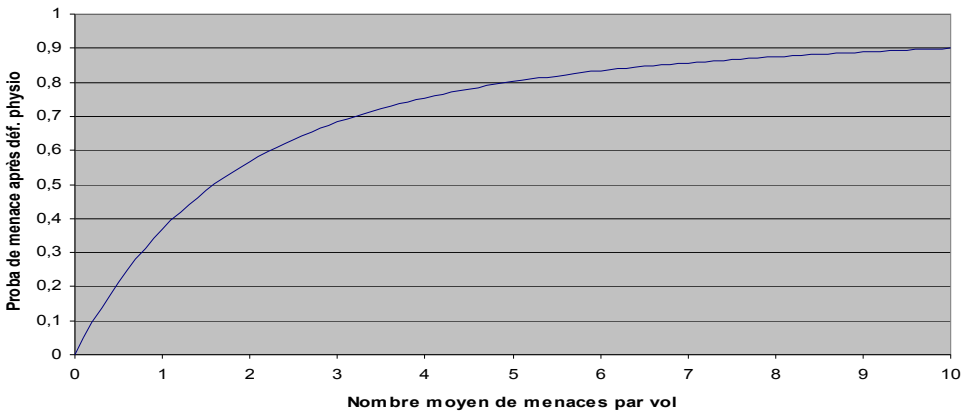
$$\lambda a = Pa/T \sim \lambda d * n / 2 \quad \text{ou} \quad \lambda a \sim \lambda d * m*C/ 2$$

On peut remarquer que ce taux moyen d'accidents ne dépend pas de la durée du vol (au moins pour les vols court et moyen-courriers), puisque le nombre moyen de menaces par vol est considéré lui-même comme indépendant de la durée du vol.

Note : Les documents Boeing (Ref 7) et Airbus (Ref8) soulignent que le nombre d'accidents mortels constatés aujourd'hui est statistiquement lié au nombre de vols, avec une incidence très faible de la durée des vols parce que les accidents apparaissent surtout au décollage et à l'atterrissage. Ceci est traduit dans l'analyse faite ici par le fait que le nombre de menaces par vol (m) est supposé constant. La dépendance de la probabilité d'accident (Pa) exprimée dans ce chapitre, à la durée du vol, vient du fait que la probabilité de défaillance physiologique (très peu sensible dans le nombre d'accidents avec équipages de deux pilotes) est supposée, de façon plutôt réaliste, proportionnelle à la durée du vol.

Figure 8 : Probabilité conditionnelle qu'au moins une "menace non gérable par le pilote" survienne pendant le temps de vol après l'apparition d'une défaillance physiologique du pilote

***Dans le cas général où n prend des valeurs proches de 1 ou grandes par rapport à 1**, l'expression de Pcm ci-dessus n'est plus valable : Pcm varie en fonction de n comme indiqué sur la courbe de la Figure 8. (Cette courbe tient compte du fait que le taux de défaillance physiologique est très petit).*



On voit par exemple que pour n = 0,5 : Pcm = 0,21 au lieu de n/2 = 0,25 qui reste cependant une bonne approximation.

Pour le besoin des analyses faites ultérieurement on peut remarquer qu'en cas d'une surveillance par le sol de l'état physiologique du pilote à la période (d'échantillonnage) DT, permettant en cas de besoin une reprise de la gestion du vol par les opérateurs sol, le taux moyen d'accidents (λa) exprimé plus haut devient alors (avec les conditions d'application décrites plus loin) :

$$\lambda a \sim \lambda d * m*C*DT/ 2*T$$

Niveau de performance théorique requis pour le pilotage autonome

(Cas de défaillance totale ou partielle sévère reconnue, suivie du pilotage autonome jusqu'à destination ou jusqu'à un aéroport de détournement)

On est ici dans le cas où après une défaillance physiologique reconnue par le pilote ou détectée à bord, le mode de sauvegarde avec pilotage autonome de l'avion est engagé jusqu'à la fin du vol (sans support sol spécifique pour le pilotage).

On admet que les mesures de sauvegarde (espacement exceptionnel des autres avions, …) permettent de diminuer sensiblement le nombre moyen de" menaces" potentiellement rencontrées, par exemple en le divisant par 2.

La capacité d'autonomie en mode de sauvegarde, nécessaire pour que l'impact sur le taux d'accidents mortels "λa1" soit inférieur à 10^{-9} accidents mortels /h de vol, s'exprime alors par la condition que, en moyenne, (voir Figure 6) : $(0{,}65 \times 10^{-6}) * (m/2) * C1/2 < 10^{-9}$

Avec m=1, la condition sur C1 devient : $C1 < 6 \times 10^{-3}$

Ainsi, afin de limiter la contribution des limitations de performance du pilotage autonome (activé après défaillance physiologique reconnue par le pilote ou détectée à bord) à 10^{-9} accidents mortels par h de vol, il faudrait que le pourcentage moyen de "menaces externes" non gérables correctement par le système de pilotage autonome et conduisant à un accident mortel soit inférieur à : 0,6 %.

Pour illustration, cette condition correspond à une capacité du pilotage autonome à assurer les vols commerciaux de bout en bout, dans un trafic normal, avec en moyenne moins de 6 accidents mortels pour 1000 vols.

Ce niveau de performance sera probablement atteint à l'horizon 2050. Certaines expérimentations en espace non ségrégé ont déjà été menées (par exemple programme ASTRAEA en UK (Réf 12) pour analyser les conditions de vol de plus en plus autonome avec le niveau de fiabilité exigé pour les vols pilotés actuels.

Cependant, au moins dans le cas d'une mise en œuvre initiale de vols de transport de passagers commerciaux avec un seul pilote à bord d'ici typiquement deux à trois décennies, il parait raisonnable de considérer une performance moyenne inférieure, de l'ordre de 50 à 20 accidents mortels sur 1000 vols (soit C1 de l'ordre de 50 à 20 x 10^{-3}).

Il faut donc prévoir au moins un support sol de type supervision et gestion, pour les phases de vol après défaillance physiologique du pilote.

Niveau de performance théorique minimum requis pour le pilotage dans le cas de perte sévère de capacité physiologique non reconnue par le pilote et non détectée à bord

Un calcul similaire au calcul ci-dessus montre que le niveau moyen de performance requis dans le cas de perte sévère de capacité physiologique, non reconnue par le pilote ($0{,}1 \times 10^{-6}$ / h de vol) et non détectée à bord s'exprime comme une contrainte sur C2 :

$$(0{,}1 \times 10^{-6}) * (m) * C2/2 < 10^{-9}$$

Avec m=1, la condition sur C2 devient : $C2 < 2 \times 10^{-2}$

Avec l'hypothèse faite précédemment sur la gravité des défaillances, la condition pour que la contribution des défaillances physiologiques partielles non reconnues par le pilote au taux d'accidents mortels soit inférieure à 10^{-9} accidents mortels /h de vol, est que la machine puisse les reconnaitre dans plus de 90% des cas.

Cette condition peut se traduire de façon équivalente sous la forme : en moyenne, moins de 2 % des défaillances physiologiques partielles sévères non reconnues par le pilote (probabilité d'occurrence : 0,2 x 0,5 x10^{-6} / h de vol) et non détectées à bord doivent conduire à une incapacité totale à effectuer les vols de bout en bout sans accident mortel. On comprend mieux la sévérité de cette condition si l'on remarque qu'elle correspondrait à moins de 1 cas tous les ~18 ans sur la base du trafic 2002-2011.

On prendra comme hypothèse pour la suite de l'analyse, que d'ici deux à trois décennies, la capacité de détection des défaillances physiologiques partielles non reconnues par le pilote serait comprise entre 0% et 50%.

La mise en œuvre d'un support sol pour l'aide à cette détection serait donc indispensable pour respecter l'objectif de sécurité des vols.

Niveau de performance théorique de pilotage avec un seul pilote à bord, hors défaillance physiologique et sans support sol de type copilote

On évalue ici l'impact de la réduction de performance de pilotage hors défaillance physiologique, lorsque l'on passe d'un équipage de 2 pilotes à 1 seul à bord, sans support sol spécifique, et on compare cet impact à la limite acceptable de 10^{-9} accidents mortels /h de vol.

L'extrapolation, même préliminaire, des performances non techniques et techniques observées pour un équipage de deux pilotes, à celles d'un pilote seul à bord est une démarche relativement incertaine. On reconnaît notamment que le niveau de stress d'un pilote seul à bord en cas de situation critique est probablement beaucoup plus élevé que celui d'un pilote au sein d'un équipage à deux confronté à la même situation. L'impact sur les performances de pilotage peut être très important. On reconnaît aussi qu'une différentiation (impossible dans l'analyse préliminaire présentée ici, compte tenu des données disponibles) devrait être faite selon le niveau d'expérience des commandants de bord. Cependant, même très approximative, une telle extrapolation est d'autant plus utile qu'elle conduit (comme montré ci-après) à conclure que la perte de performance ne peut pas être négligée.

Niveau d'expérience des Commandants de bord

Les données tirées du document en (Réf 1) sont relatives aux performances moyennes des équipages, observées lors d'un ensemble de vols commerciaux, sans différentiation selon les niveaux d'expérience de chacun des pilotes au sein de l'équipage. Comme indiqué plus haut l'extrapolation des observations faites avec des équipages de deux pilotes à la performance d'un pilote seul à bord exige une telle différentiation. Il est hautement probable que le besoin d'assistance sol à un pilote seul à bord, soit très variable selon le niveau d'expérience de ce pilote.

Par ailleurs, l'évolution vers un nombre significatif de vols avec un seul pilote à bord ferait apparaître une difficulté pour la formation pratique et l'acquisition d'expérience des jeunes pilotes puisque le nombre de positions de copilotes serait réduit.

De façon préliminaire, on remarque ici que la transition vers des vols commerciaux avec un seul pilote à bord ne se ferait pas de façon brutale. La période de transition verrait d'autres progrès dans l'autonomie des systèmes, et dans les interfaces Homme-machine, ce qui permettrait probablement de pallier la moindre expérience des pilotes dans les décennies suivantes.

Pour les besoins de notre analyse dans cette première partie du document, on considère que les pilotes potentiellement sélectionnés pour les vols avec un seul pilote à bord auraient déjà acquis une large expérience du pilotage au cours de vols court, moyen ou long-courriers au sein d'équipages de plusieurs pilotes.

On verra dans la seconde partie du document comment tenir compte du différentiel d'expérience entre pilotes.

Evaluation de la performance attendue à l'horizon 2050

Méthodologie : L'analyse utilise à nouveau les données tirées des Réf 1 et Réf 2 relatives aux performances moyennes du commandant de bord et du copilote pour le management des erreurs et des menaces externes ainsi que pour le management "non-technique". Les données fournies incluent le nombre et la répartition par type et par origine (commandant, copilote, non allouées) des erreurs initiales. Par contre certaines hypothèses ont dû être faites ici sur la répartition "par type" des taux d'erreurs résiduelles après un première étape de détection et traitement.

Une première extrapolation permet d'estimer les performances théoriques d'un pilote seul à bord avec des automatismes peu différents de ceux d'aujourd'hui mais en négligeant les effets de surcharge de travail dus au passage de deux à un seul pilote à bord. Ces performances ne sont donc que des

intermédiaires de calcul. On estime dans un deuxième temps les objectifs de performance à l'horizon 2050 qui devraient être atteignables grâce aux progrès technologiques déjà évoqués dans ce Livret.

Résultats *:* En reprenant les types de performances définies dans la table 1, la première extrapolation fait appel à un "jugement d'ingénieur" sur l'impact du passage de deux à un seul pilote, exprimé comme suit :

- Aucune dégradation des performances de type " Non Maîtrise du Pilotage / Compétence" compte tenu de l'hypothèse faite sur le niveau non dégradé de l'expérience du commandant de bord.

- Une dégradation potentielle de 40 à 60% des performances de type "Procédure", Omission ou action inappropriée puisque la vérification par le second pilote permet apparemment d'enlever jusqu'à 40% des erreurs de ce type au sein d'un équipage à deux. (On note que certains pilotes considèrent au contraire qu'un pilote seul à bord est plus attentif aux erreurs qu'il peut commettre).

- Une dégradation potentielle de 30% à 50% des performances liées à la " Perte de repère concernant la position de l'avion " et "communications" puisque la vigilance du second pilote, l'assistance qu'il apporte et les vérifications qu'il effectue sont importantes au sein d'un équipage à deux, aujourd'hui.

- Entre 10% et 20 % de dégradation des performances de type " Perte de repère concernant la position de l'avion / Prise de décision opérationnelle " compte tenu du fait que le commandant de bord a déjà une influence prépondérante dans les décisions au sein d'un équipage à deux.

- Une dégradation potentielle de 50 % de la performance non-technique compte tenu de la moindre obligation naturelle pour le pilote seul à bord d'ordonner ses actions.

- Entre 0% et 20% de dégradation du nombre d'erreurs de type " Non-respect délibéré des procédures / Non-Conformité Intentionnelle " qui sont déjà surtout le fait du commandant de bord au sein d'un équipage à deux.

En utilisant les statistiques sur les "causes" d'accidents mortels" déjà utilisées dans ce Livret, on peut évaluer une augmentation théorique de l'apparition de ces causes d'accidents mortels et donc l'impact en % sur le nombre réel d'accidents mortels. Ces résultats sont présentés dans la table 4 ci-dessous.

Table 4 : Impact théorique du passage à un seul pilote à bord, sur la base des automatismes d'aujourd'hui (au niveau mondial et hors défaillance physiologique)

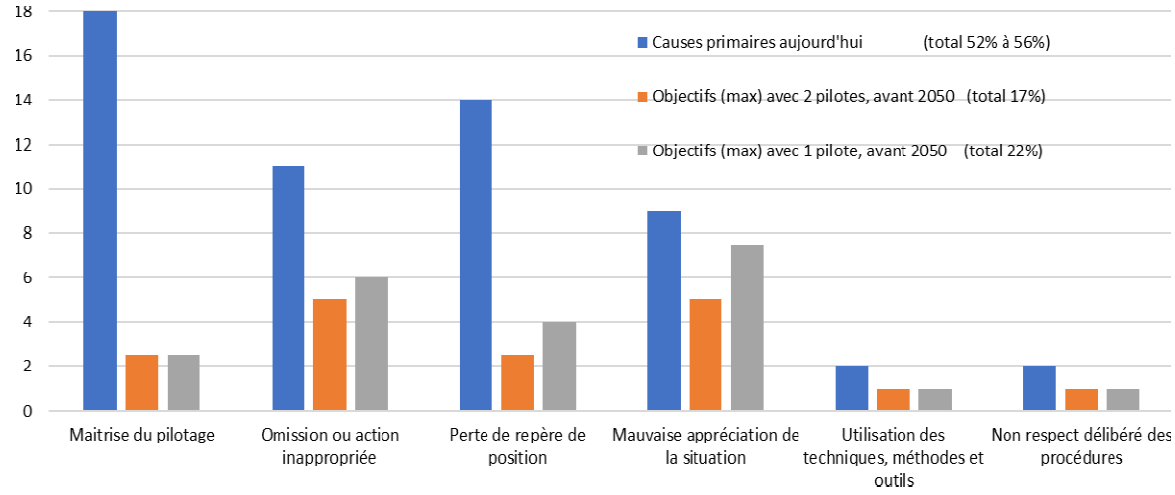
	(%) des causes primaires d'accidents mortels aujourd'hui (rappel)	Impact du pilotage avec 1 seul pilote à bord : Augmentation en % du nombre d'accidents d'aujourd'hui
Non Maîtrise du Pilotage	18	0
Omission ou action inappropriée	11	1,2 à 2,4 %
Perte de repère concernant la position de l'avion	14	3 à 5 %
Mauvaise appréciation de la situation, manque de professionnalisme	9	0,8 à 1,6 %
Utilisation des techniques, méthodes et outils	2	1 %
Non-respect délibéré des procédures	2	0 à 0,4 %
Total		~ 5 % à 10 %

La deuxième étape de l'estimation des performances atteignables (et donc des objectifs) à l'horizon 2050 tient compte des apports potentiels des développements techniques et technologiques en cours ou à venir, tels que discutés pour les équipages de 2 pilotes.

Comme sur la Figure 4, les objectifs présentés sur la Figure 8 concernent la réduction des taux d'accidents mortels pour les opérateurs de l'Amérique du Nord et/ou de l'UE. En l'absence d'assistance

sol, le passage d'un équipage de deux pilotes à un seul pilote à bord, pourrait conduire à l'horizon 2050 à un différentiel de quelques % (typiquement 5 % à 10 % voir table 4) du nombre d'accidents calculé sur la base du nombre d'accidents d'aujourd'hui soit : ~ 8 % à 17 % de l'objectif à l'horizon 2050 (compte de l'amélioration globale dans un rapport 1,7 attendue en Amérique du Nord et dans l'UE). L'effet potentiel de la perte de performance (hors défaillance physiologique), sur le taux d'accidents mortels en Amérique du Nord et dans l'UE (objectif: moins de $0{,}05 \times 10^{-6}$ accidents mortels /h de vol) pourrait donc être de l'ordre de 4×10^{-9} (8% de $0{,}05 \times 10^{-6}$) à 8×10^{-9} (17% de $0{,}05 \times 10^{-6}$) accidents mortels /h de vol (c'est à dire très significativement supérieur à la limite de 10^{-9} accidents mortels /h de vol) si aucun support sol de type copilote n'est apporté pour les phases critiques du vol.

Figure 8 : Objectifs typiques de réduction d'ici à 2050 en Amérique du Nord et EU des causes primaires d'accidents mortels (en % du taux d'accidents mortels aujourd'hui) **avec 1 seul pilote à bord**



Synthèse sur les points bloquants pour un pilotage avec un seul pilote à bord en l'absence de support sol spécifique

Les niveaux de performances exigées pour le pilotage avec un seul pilote à bord ne permettent pas d'envisager une mise en œuvre d'ici 2 à 3 décennies sans apport supplémentaire par rapport à la situation d'aujourd'hui, du fait des points bloquants suivants :

- Le niveau de risque élevé associé aux défaillances physiologiques sévères non reconnues par les pilotes,

- Le niveau potentiellement encore insuffisant de sécurité de vol en mode sauvegarde avec pilotage autonome à l'horizon 2050,

- La réduction potentiellement sensible de la performance nominale d'un équipage d'un seul pilote par rapport à équipage à deux.

L'apport additionnel peut consister en un support spécifique depuis le sol, mis en œuvre en cas de besoin.

Exigences relatives au support sol et à la disponibilité des liens de télécommunications pour une mise en œuvre du pilotage avec un seul pilote à bord d'ici 2 à 3 décennies

Les bénéfices attendus d'un support sol concernent les fonctions :

- d'aide à la détection de défaillance physiologique du pilote à bord

- de supervision voire de reprise de la responsabilité du pilotage depuis le sol pour les phases de vol après défaillance physiologique du pilote

- d'assistance au pilote hors défaillance physiologique, pour les phases critiques du vol (ce besoin apparaît aussi pour l'ensemble du vol dans le cas de défaillances légères du pilote)

L'assistance pourra être étendue à tous les cas où un doute apparaît sur l'intégrité des capacités physiologiques du pilote, potentiellement beaucoup plus nombreux que les cas réels de défaillances physiologiques caractérisées précédemment.

Il apparait donc clairement que les supports sol doivent être apportés par des opérateurs qualifiés en tant que pilotes. On les désignera donc pour la suite du Livret comme des « pilotes au sol »

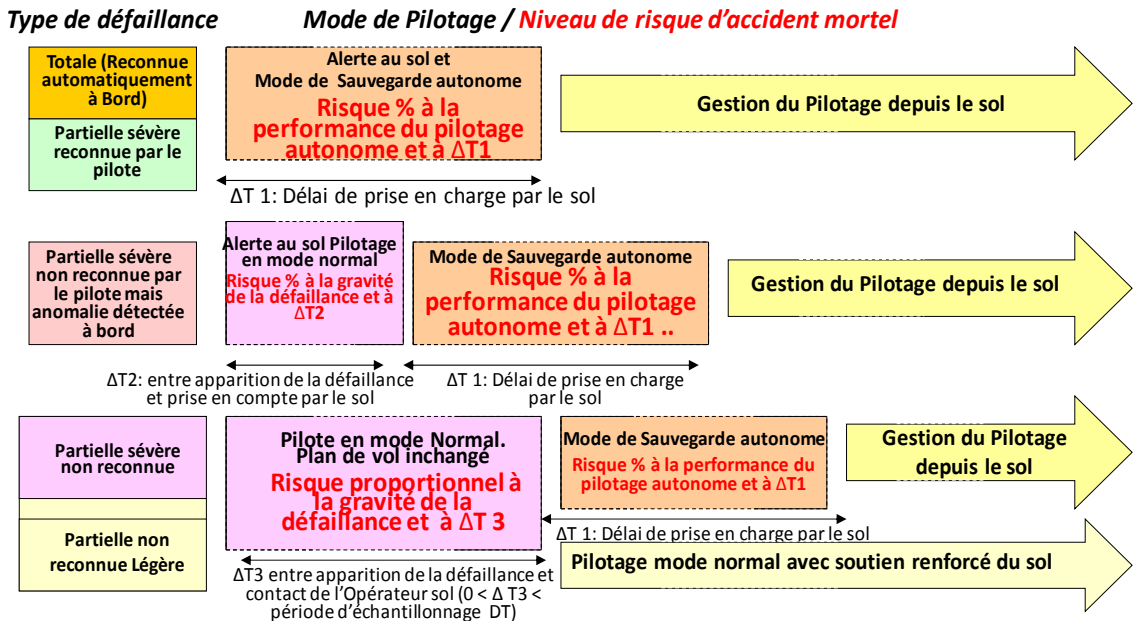
On analyse ci-après les exigences de mise en œuvre de ces supports et on présente, pour illustration, dans la 2éme partie du Livret un scénario typique de mise en œuvre.

Pour des raisons économiques, il ne semble pas envisageable d'avoir pour chaque vol un pilote au sol assurant le suivi de façon continue et exclusive. Hors situation critique sur un vol, chaque pilote au sol aurait donc l'obligation d'assurer de façon séquentielle le suivi et le support pour plusieurs vols. Lors de chaque intervention en support ou en substitution d'un pilote à bord, il aurait l'obligation d'acquérir ou d'actualiser à un niveau plus ou moins détaillé, sa connaissance des ressources et du contexte propres à l'avion, à son type et à sa version, ainsi que de son environnement. Dès lors, l'un des facteurs clés de l'organisation générale des supports sol est la capacité des pilotes au sol, en termes de flexibilité, rapidité et fiabilité, à intégrer ou à mettre à jour leur connaissance spécifique de chaque vol lors de chaque intervention pour l'assistance nominale comme pour la reprise éventuelle de la gestion du pilotage. Ce point est pris en compte dans la 2éme partie du Livret, mais il est reconnu que de nombreuses recherches, expérimentations et validations seront nécessaires pour caractériser la performance humaine dans le cadre spécifique de l'activité considérée.

Séquences d'événements à bord et au sol, en cas de perte de capacité physiologique du pilote

Les séquences d'événements sont illustrées sur la Figure 9 selon les types de défaillances et les alarmes ou détection de défaillances activées.

Figure 9 Séquences d'événements possibles suite à une défaillance physiologique du pilote



Sur la Figure 9 :

- Ligne 1 : Une défaillance physiologique totale est détectée à bord et donne lieu à l'engagement immédiat du mode sauvegarde avec pilotage autonome de l'avion. De même une défaillance partielle sévère reconnue à bord donne lieu à ce même engagement du mode de sauvegarde. Le sol est alerté sans délai. Le pilote au sol en charge du suivi de l'avion rétablit, si elles ne sont pas déjà établies, les liaisons de données à haut débit, se remet dans le contexte du vol, fait appel en renfort à un autre opérateur sol et se prépare à reprendre la gestion du pilotage depuis le sol. Le risque pour la sécurité du vol durant cette phase intermédiaire est lié à sa durée $\Delta T1$, à la performance du mode de pilotage autonome et à la densité des menaces. La responsabilité du pilotage est ensuite transférée vers le sol.

- Ligne 2 : Une alerte est envoyée vers le sol par la machine en cas de consigne de pilotage potentiellement révélatrice d'une défaillance physiologique (voire psychologique) du pilote à bord ou par un Membre du personnel de cabine en cas d'une grave anomalie à bord (on peut penser évidemment à l'accident du vol Germanwings en mars 2015). Le pilotage reste sous la responsabilité de l'ensemble « pilote-machine » à bord pendant que le pilote au sol tente d'établir une liaison avec le pilote à bord ou d'analyser la situation en coopération avec lui. Le risque durant cette phase est lié à sa durée $\Delta T2$, à la gravité de la défaillance du pilote à bord, et/ou à la densité des menaces externes. Le pilote au sol peut alors imposer par commande directe à la machine le passage en mode de sauvegarde avec pilotage autonome pour une durée $\Delta T1$ correspondant au temps nécessaire à sa préparation de la reprise effective de la gestion du pilotage.

- Ligne 3 : Aucune alerte et aucune détection de défaillance physiologique du pilote n'est faite à bord. Le pilote au sol en charge du suivi de l'avion prend contact périodiquement (période DT) avec le pilote à bord pour s'assurer du bon déroulement du vol et du bon niveau de capacité physiologique. Si le pilote à bord est soumis à une perte de capacité physiologique, le délai $\Delta T3$ entre l'apparition de la défaillance et le contact à l'initiative du pilote au sol est donc inférieur ou égal à DT. Le risque durant cette phase est lié à sa durée $\Delta T3$, à la gravité de la défaillance physiologique et à la densité des menaces. En cas de constat de défaillance sévère du pilote à bord, le pilote au sol impose par commande directe à la machine le passage en mode de sauvegarde avec pilotage autonome pour une durée $\Delta T1$ correspondant au temps nécessaire à sa préparation de la reprise effective de la gestion du pilotage. En cas de défaillance légère constatée la responsabilité du vol reste assurée par le pilote à bord, mais le support sol peut être renforcé pour la suite du vol jusqu'à l'atterrissage et au roulage.

Fonctions spécifiques à mettre en place vis à vis des risques de défaillance physiologique du pilote à bord

Ces fonctions spécifiques incluent :

- *La détection de la perte de capacité physiologique et la mesure de son niveau de sévérité (potentiellement évolutive au cours du vol).* Un dialogue de niveau expert (relativement au pilotage) est établi périodiquement avec le pilote à bord par le pilote au sol qui a donc obligation d'acquérir une bonne connaissance des ressources et du contexte de l'avion.

- *La prise de décision du transfert (si nécessaire) de la responsabilité du pilotage pour la suite d'un vol ou pour certaines phases du vol.* La prise de décision de transférer la responsabilité du pilotage vers le sol dans les cas de perte totale de capacité du pilote à bord, est aisée. Elle est beaucoup plus difficile, d'un point de vue psychologique, dans le cas de perte partielle de capacité avec déni du pilote à bord. Le rôle décisionnaire pourrait être attribué au pilote au sol secondé temporairement pour les décisions difficiles par un autre intervenant formé, et ayant autorité, pour gérer ce type de situation. Dans tous les cas où le pilote à bord n'est plus apte à assumer la responsabilité du pilotage, le mode de pilotage autonome est engagé pour donner le temps au Centre de support sol d'organiser son intervention.

- *Le transfert effectif de la responsabilité du vol avec la reconfiguration des moyens et du personnel permettant ce transfert.* Hors alerte relative à la défaillance du pilote à bord et hors "menace extérieure

au cockpit", le volume de données à transmettre entre l'avion et le sol, relativement au contexte, à l'environnement et aux ressources de l'avion doit rester limité pour satisfaire aux exigences économiques. Lors de la détection d'une défaillance physiologique du pilote à bord justifiant la prise de responsabilité du pilotage par le sol, la liaison de télécommunications est reconfigurée pour assurer un débit de données et des délais de transmission compatibles d'une gestion du pilotage depuis le Centre de support sol.

Le temps de reconfiguration de la liaison de communications, ainsi que le temps de remise en "situation" du pilote au sol avant la reprise en main effective du pilotage doivent être minimisés pour limiter le risque d'apparition d'une menace externe pendant cette transition.

La disponibilité, fiabilité, qualité et sécurité des liens de télécommunications doivent être suffisantes pour limiter l'impact sur le taux d'accidents mortels à une valeur négligeable.

- *La gestion effective du pilotage de l'avion depuis le sol.* Le pilotage de l'avion doit être géré directement depuis le sol, sans intervention humaine à bord, lorsqu'un transfert de la responsabilité du vol a été décidé.

Note : Si pour des raisons de sécurité vis à vis d'éventuels actes de piratage, il apparaît qu'il est préférable d'interdire physiquement la prise en main des avions de transport de passagers commerciaux depuis le sol, on peut envisager de donner à certains membres du personnel en cabine la qualification minimum nécessaire pour servir d'auxiliaire entre l'opérateur sol et l'avion (par exemple programmation du FMS avec surveillance vidéo depuis le sol), en cas de besoin. Cette approche n'écarterait évidemment pas le risque d'acte de piraterie à bord, mais éviterait le risque d'aggravation éventuelle par rapport à la situation actuelle.

Formulation des probabilités d'accidents en passant de deux à un seul pilote en opération à bord avec l'aide d'un support sol

On ne s'intéresse ici qu'au différentiel de probabilité d'accidents en passant d'un équipage de deux pilotes à bord à un seul pilote en opération à bord avec un support sol spécifique.

La Figure 10 donne une vue d'ensemble des éléments contributifs à ce différentiel de probabilité d'accidents mortels **:** avec $\Delta P = Pa5 + Pa6 + Pa7 + Pa8$ et $Pa6 = Pa6a + Pa6b$

Figure 10 Probabilité additionnelle d'accidents au cours d'un vol en passant de deux à un seul pilote à bord avec l'aide d'un support sol (Voir les notations relatives aux" ΔTi**"** sur la Figure 9)

Dans le schéma ci-dessus :

- les caractéristiques des menaces sont telles que définies précédemment,

- On note Ci (i= 5 à 8) les taux d'échecs dans la gestion des menaces conduisant à un accident mortel. Le taux C5 est directement lié au niveau de performance du mode de sauvegarde avec pilotage autonome de l'avion. Les taux d'échecs de la gestion du pilotage (C6 et C7) sont directement dépendant des états de capacité physiologique correspondants du pilote. Le taux d'échec différentiel (C8) traduit la différence de performance, hors défaillance physiologique, entre le pilotage avec deux pilotes et un seul pilote à bord, avec un support sol.

- Les 4 événements combinés sont indépendants (et exclusifs). La probabilité additionnelle d'accidents en passant de 2 pilotes à 1 seul à bord est la somme des 4 probabilités d'événements combinés (Pa5 + Pa6(a+b) + Pa7 + Pa8)

On reprend les objectifs de sûreté déjà définis : " l'impact global sur le taux d'accidents mortels du passage de deux à un seul pilote à bord ne devrait pas dépasser typiquement le 1/20 de $0{,}05 \times 10^{-6}$, soit $2{,}5 \times 10^{-9}$ accidents mortels /h de vol".

Pour la simplicité des analyses :

- on considère que chacune des probabilités Pa5, Pa6 avec Pa6 =(Pa6a+Pa6b) et Pa8 devra correspondre à un taux moyen d'accidents (Pai/T) inférieur à 10^{-9} accident mortels /h de vol.

- on néglige le contributeur correspondant aux pertes légères de capacités physiologiques.

On remarque que pour que les probabilités d'événements combinés de type : "défaillance physiologique", suivie de "accident mortel" pendant la gestion du pilotage par le sol deviennent négligeables, il faut que le niveau de performance du pilotage depuis le sol corresponde à un taux d'accident inférieur à 10^{-3} par heure de vol. Une telle performance est déjà largement atteignable aujourd'hui.

On admet que, *hors défaillance physiologique*, l'impact sur le taux d'accidents mortels du passage de deux à un seul pilote à bord pourrait être ramené de 4 à 8 $\times 10^{-9}$ / h de vol en l'absence de support sol à moins de 10^{-9} / h de vol avec un support sol approprié.

Contraintes sur le délai (DT) entre les contacts sol et sur les délais de prise en charge par le sol.

Compte tenu des diverses hypothèses faites ci-dessus et sachant que :

$$m * Ci << 1 ; \quad \Delta T1, DT \text{ et } \Delta T3 << T :$$

les probabilités "Pai" et les taux d'accidents mortels par heure de vol "λai" peuvent s'écrire comme suit:

$$Pa5 = \lambda a5 * T \sim (0{,}65 * 10^{-6} * T) * (m * C5 * \Delta T1/T)$$

$$Pa6 = \lambda a6 * T \sim (0{,}1 * 10^{-6} * T) * (m * C5 * \Delta T1/T + m * C6 * DT/2 * T)$$

Les conditions λa5 et $\lambda a6 < 10^{-9}$ se traduisent respectivement (avec m=1 et T = 1,7 h) en :

$$C5 * \Delta T1 < 17 * 10^{-3} \quad \text{avec } \Delta T \text{ en heure, et}$$

$$C5 * \Delta T1 + C6 * DT/2 < 17 * 10^{-3}$$

La deuxième condition est bien évidemment la plus contraignante.

Avec les hypothèses déjà faites précédemment :

C5 compris entre 0,05 et 0,02 et C6 compris entre 0,2 et 0,1

Avec un délai de prise en charge ΔT1 nul, La période d'échantillonnage de la surveillance de l'état physiologique du pilote à bord depuis le sol, DT devrait être de l'ordre de :

10mn (C6 = 0,2) à 20 mn (C6 = 0,1)

En réalité le délai de prise en charge ΔT1 ne peut pas être négligé puisqu'il couvre les délais de reconfiguration de la liaison de communication, ainsi que de remise en "situation" du pilote au sol.

La reconfiguration de la liaison de communications devrait pouvoir se faire en moins de, typiquement : 1 minute. Le temps de remise en situation du pilote au sol (ou de l'équipe d'opérateurs) sol est discuté dans la partie 2 du Livret. Selon le mode d'organisation des supports sol, il peut varier de 5 à 10 mn pour la phase initiale d'acquisition du contexte de l'avion et de son environnement et de 3 à 5 mn pour les phases de rafraîchissement.

Avec un délai de prise en charge de l'ordre de 8 mn, alors la période d'échantillonnage DT devrait être elle-même typiquement de moins de : 6 mn (pire cas) à 17 mn.

On fera dans la partie 2 du Livret un pré dimensionnement beaucoup plus réaliste des interventions systématiques du pilote au sol auprès du pilote au cours d'un vol, en tenant compte notamment de la grande "non uniformité" du taux de "menaces externes au cockpit" tout au long du vol.

Fiabilité, disponibilité et bande passante exigées des moyens de communication pour les besoins spécifiques du pilotage avec un seul pilote à bord

Indépendamment du nombre de pilotes à bord, les moyens de communications seront beaucoup plus utilisés en 2050 qu'aujourd'hui pour les échanges d'informations point à point ou en réseau avec les autres avions et diverses stations sol.

On ne s'intéresse ici qu'aux "communications spécifiques" (en complément des communications mises en œuvre dans le cas des équipages de deux pilotes) nécessaires pour la mise en œuvre du pilotage avec un seul pilote à bord.

Fiabilité des moyens de communications spécifiques

Une panne (définitive) des moyens de communications spécifiques ramène sensiblement à la situation sans support sol spécifique.

On supposera que l'envoi d'une alerte au sol en cas de détection de défaillance physiologique du pilote est particulièrement sécurisé par redondance multiple des liens par exemple (taux d'insuccès inférieur à 10^{-4}), même si par ailleurs le sol ne peut plus communiquer avec l'avion.

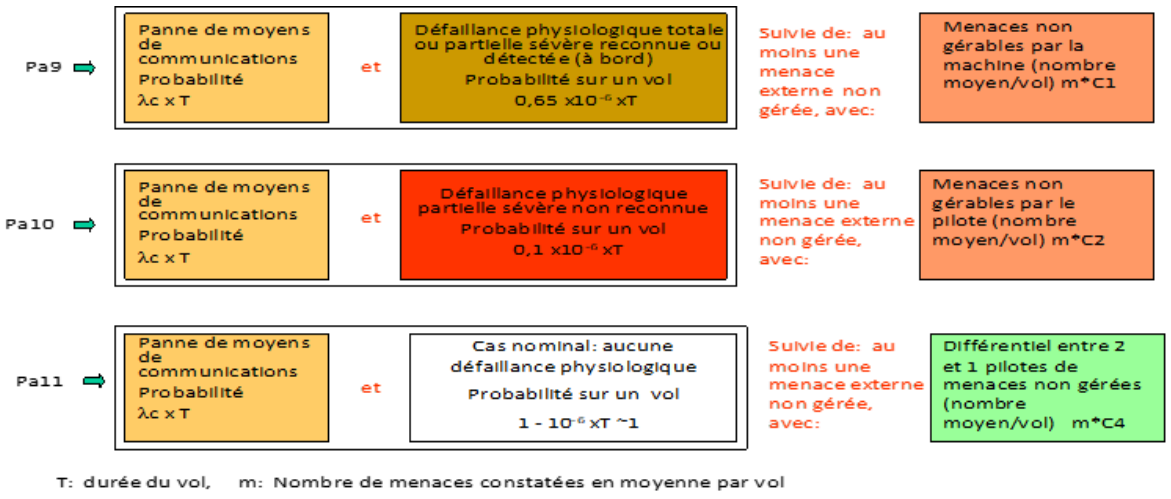
Pour rappel, les hypothèses prises sur les capacités de maîtrise des menaces, sont :

- Performance du mode de sauvegarde avec pilotage autonome : >95% (soit C1=C5< 0,05)

- Performance moyenne des pilotes victimes de défaillances physiologiques sévères non reconnues à bord : >80% (soit C2= C6 < 0,2)

La perte de fiabilité du pilotage en passant de deux pilotes à seul un pilote en opération à bord en tenant compte de la fiabilité des liens de télécommunications (taux de panne λc par h de vol), apparaît comme ΔP = Pa9 + Pa10 + Pa11 , avec les Pai comme définies sur la Figure 11. Cette figure reprend le schéma de la Figure 6 avec des simplifications d'analyses mais en ajoutant la contribution des pannes potentielles des liens de communications (taux de panne λc par heure de vol)

Fig 11 Perte de fiabilité du pilotage en passant de deux à seul un pilote en opération à bord, en tenant compte des liens de télécommunication



Les probabilités de pannes, sur un vol de durée T, correspondant à chacun des événements combinés représentés sur la Figure 12 s'expriment comme suit :

$$\lambda a9 = Pa9/T = \lambda c * 0{,}65 \times 10^{-6} * (m*C1)*T/3$$

$$\lambda a10 = Pa10/T = \lambda c * 0{,}1 \times 10^{-6} * (m*C2)*T/3$$

$$\lambda a11 = Pa11/T \sim \lambda c * m*C4/2$$

La condition sur le taux de panne (λc) des moyens de communications pour que la perte de fiabilité du pilotage soit globalement inférieure à 10^{-9} accidents mortels /h de vol s'écrit donc (pour la moyenne des vols) :

$$\lambda a9 + \lambda a10 + \lambda a11 < 10^{-9} \text{ accidents mortels /h de vol}$$

Note : On peut remarquer que λa9 et λa10 sont proportionnels au temps de vol T (probabilité d'accident proportionnelle au carré du temps) ce qui résulte de la proportionnalité au temps de vol des deux probabilités d'événements contributifs : défaillance physiologique et panne des moyens de télécommunications. La conséquence est que l'on ne peut pas considérer seulement la valeur moyenne des durées des vols pour le calcul de la condition sur le taux de panne des liens de communications (λc), et qu'il faut tenir compte de la distribution de ces durées autour de la valeur moyenne.

Ainsi la condition : $\alpha * T < 10^{-9}$ avec une distribution des durées de vol Ti de T1 à Tn telle que :

. $$(1/n)\ \Sigma Ti = 1{,}7\ h \quad s'écrit\ (\alpha * \Sigma (Ti*Ti))/\ \Sigma Ti < 10^{-9}$$

De façon prudente, on considérera que la condition ci-dessus pour λc s'applique (non seulement à la moyenne des vols, mais aussi) à chacun des vols courts et moyens courriers avec un seul pilote effectivement à bord.

Avec m=1 ; C1 = 0,05 ; C2 = 0,2 et m*C4~ (7 à 14) $*10^{-9}$ par vol (correspondant aux :

(4 à 8) $*10^{-9}$ accidents par h de vol calculés précédemment, la condition sur λc est donc :

- $\lambda c < 10^{-2}$ par heure de vol pour des vols de 5 heures
- $\lambda c < 3 *10^{-2}$ par heure de vol pour des vols de 1,7 heure

La condition ci-dessus correspond à des niveaux de fiabilité (probabilité de non panne) presque identiques pour des vols de 1,7 ou de 5 heures, de : ~ 0,95

Disponibilité et continuité de service des moyens de communications spécifiques

La notion de disponibilité doit être caractérisée précisément selon le type d'utilisation. Elle peut être comprise ici, en première analyse, comme la possibilité d'utiliser efficacement les moyens de communications (donc sans interruption pénalisante pour l'efficacité des échanges) pendant toute la durée de la gestion d'une "menace externe au cockpit non gérable à bord", depuis sa détection jusqu'au retour à une situation nominale. Avec l'hypothèse d'un taux uniforme de menaces sur l'ensemble du vol, on peut montrer, toujours par analyse de probabilité, que pour limiter l'impact des pertes de disponibilité des communications à moins de 10^{-9} accidents mortels /h de vol, le taux moyen d'indisponibilité doit rester inférieur à typiquement ~ $2 * 10^{-2}$. Cette condition peut se traduire de façon pratique par : *"les liaisons de communications doivent être disponibles, sans interruption majeure de plus d'une dizaine de secondes, sur des durées de 5 à 15 mn dans au moins 98% des cas"*.

L'analyse spécifique du besoin de disponibilité à chaque instant est à faire pour chaque phase de vol en tenant compte de la distribution non uniforme de l'apparition des menaces au cours du temps (voir partie 2 du Livret). Ainsi la disponibilité demandée sera beaucoup plus forte durant les phases de vol à proximité des aéroports, c'est à dire lorsque des liens terrestres ou des liaisons directes de communications pourraient être utilisés (permettant si nécessaire l'établissement d'une redondance hétérogène au niveau des liens de communication en cas d'alerte à bord).

Bande passante des moyens de communication pour les besoins spécifiques de gestion du pilotage depuis le sol

L'analyse a montré qu'après transfert de la gestion du pilotage vers le sol, le pilote au sol doit avoir les moyens d'assurer la sécurité du vol avec un taux d'accident inférieur à 10^{-3} par heure de vol.

Cette contrainte n'est pas sévère en elle-même, mais il est probable que l'acceptation par le public d'un pilotage avec un seul pilote à bord passera par la démonstration que le pilote au sol a la possibilité d'agir en secours sur l'avion de façon assez similaire au pilote à bord, c'est à dire (presque) les mêmes bandes passantes que le pilote à bord.

Ces besoins en bande passante s'appliquent aussi (au moins en partie) aux phases de vol pendant lesquelles le pilote au sol assure une fonction de type "assistant".

Compte tenu de l'autonomie de plus en plus grande du pilotage "court terme" des avions, on prendra pour les constantes de temps requises pour les supports sol d'ici à quelques décennies : une à quelques secondes dans les phases les plus critiques du vol (donc hors phase de croisière) et de 1 à quelques minutes pendant la phase de croisière.

Les liens de communications via des relais en orbite géostationnaire imposent des temps de latence de 1 à 2 secondes potentiellement trop contraignants vis à vis du besoin en bande passante pour la gestion du pilotage depuis le sol lors des phases de vol à proximité du sol ou sur les zones aéroportuaires. Par contre ces relais sont parfaitement utilisables lors des phases de croisière notamment, en concurrence avec les satellites de communications en orbites basses et, lorsqu'ils sont disponibles, avec les liens terrestres ou directs.

Les liens de communications par radiofréquence directs ou terrestres, disponibles très généralement pour les phases de vol hors croisière, permettent d'assurer les bandes passantes requises correspondant à des temps de latence de communication de 1 à quelques secondes.

La nature, les volumes et les débits de communications spécifiques au cas du pilotage avec un seul pilote à bord sont brièvement discutés dans la partie 2 du Livret.

Conclusions et Recommandations

L'analyse des améliorations potentielles à court terme de la sécurité du pilotage en évoluant vers plus d'automatismes embarqués est difficile parce que beaucoup d'incertitudes demeurent sur les aspects, l'un positif, l'autre négatif du comportement humain dans le contexte spécifique des vols opérationnels.

Compte tenu du nombre, fort heureusement très faible d'accidents, les améliorations seraient facilitées si des relevés systématiques de performances étaient faites au cours de l'ensemble des vols. Les relevés actuels d'événements et de performance des pilotes en situations réelles ou lors d'expérimentations : "Line Operations Safety Assessments", Programme de Gestion mondiale des données de l'aviation mis sur pied par l'IATA (Réf 10), … visant à mieux comprendre les éléments contributifs à la sécurité du transport aérien sont riches d'enseignements. Mais malgré les difficultés de mise en œuvre et d'acceptation par les pilotes et les Compagnies aériennes, une redéfinition des objectifs de mesures et une densification significative des relevés est souhaitable pour constituer une large base statistique représentative notamment des situations les plus diverses telles que celles rencontrées lors d'accidents.

A l'aide des données disponibles sur les performances de pilotage, par type, lors de vols opérationnels et des données sur les statistiques et les causes d'accidents mortels, on a tenté dans ce document de caractériser sommairement le lien de cause à effet afin d'en illustrer l'utilisation potentielle pour :

- orienter les efforts d'amélioration de la sécurité du pilotage sur la base des performances au moins partiellement mesurables hors accident, dans le cas d'équipages de deux pilotes à bord comme aujourd'hui

- analyser quantitativement les exigences relatives au support sol dans le cas d'une évolution au moins partielle vers un pilotage avec un seul pilote à bord.

L'objectif de réduction au fil des décennies du taux d'accidents mortels des avions de transport commerciaux dans une proportion au moins équivalente à l'augmentation du nombre de vols semble atteignable pour la partie relative au pilotage, grâce à une coopération étroite entre l'Homme (tel qu'il est aujourd'hui et restera encore en 2050 - on n'aborde pas ici les hypothétiques modifications de l'Humain lui-même) et la machine (telle qu'elle pourra être demain).

L'évolution vers un pilotage avec un seul pilote en opération à bord pour une partie des vols à l'horizon de deux à trois décennies nécessitera la mise en place de supports sol spécifiques et le développement des capacités de vol autonome. Mais les usagers du transport aérien n'accepteront une telle évolution que si elle est maîtrisée c'est à dire si l'anticipation des problèmes potentiels permet d'éviter les "accidents de jeunesse" lors de la mise en œuvre. En conséquence, des efforts importants doivent être faits pour la caractérisation des risques de défaillances physiologiques, ainsi que pour la détection des pertes de capacité correspondantes des pilotes. La phase indispensable d'expérimentation et de validation devrait être suivi d'une mise en œuvre opérationnelle initiale extrêmement prudente avec un assistance sol relativement dense, pendant plusieurs années. C'est typiquement cette phase de mise en œuvre opérationnelle initiale qui est illustrée dans la 2éme partie 2 du Livret.

Quelques recommandations importantes sont formulées ci-après :

- Densifier significativement les relevés (anonymes) de performances négatives et effectuer des relevés des performances positives (ce qui n'est pas fait aujourd'hui) des pilotes et globalement du pilotage, lors des vols opérationnels, afin de constituer une base suffisamment large pour les analyses statistiques, représentative des situations les plus diverses y compris celles rencontrées lors d'incidents majeurs ou d'accidents.

- Caractériser à l'aide de relevés systématiques les performances mesurables à différents niveaux : « en amont » au niveau des actions et décisions initiales des pilotes dans leurs cockpits, « par fonction » aux niveaux intermédiaires, et enfin au niveau des « protections globales ».

- Effectuer (aussi) des relevés en grand nombre lors de vols opérationnels actuels (militaire ou civils) avec un seul pilote à bord, avec l'objectif de mieux caractériser les comportements et les performances individuelles des pilotes, y compris en situation de stress ou de défaillance physiologique plus ou moins sévère.

- Caractériser les probabilités associées aux pertes de performances des pilotes dans les cas de défaillance physiologique et analyser les moyens de détection potentielle.

- Continuer les développements et les tests de démonstrateurs de vols autonomes

Partie 2 : ILLUSTRATION de l'ASSISTANCE SOL dans le CAS d'UN SEUL PILOTE à BORD

On illustre dans cette 2éme partie du Livret, l'assistance sol requise pour la mise en œuvre du pilotage avec un seul pilote à bord, en tenant compte de la répartition non uniforme des "menaces externes au cockpit" tout au long du vol. On tient compte aussi, de façon globale, de l'ensemble des contraintes réalistes, notamment :

- de la nécessité de détecter autant que possible la plupart des pertes partielles de capacités physiologiques (y compris les pertes a priori les moins critiques)

- de l'intérêt d'apporter une aide au pilote (adaptée selon le niveau d'expérience individuel des commandants de bord) même en l'absence de toute défaillance physiologique.

- du temps nécessaire au pilote au sol pour se mettre dans le contexte de l'avion et de son environnement avant la prise effective de responsabilité du pilotage, en cas de nécessité.

La mise en œuvre du support sol, au sein de "Centres Support Sol" (CSS), présentée ici correspond typiquement à une première période d'opérations sur 5 à 10 ans permettant de mieux appréhender le comportement en général des pilotes seuls à bord, sans prendre le risque de voir une série d'accidents discréditer pour longtemps auprès des passagers la nouvelle approche du pilotage.

Une évolution naturelle vers un support sol allégé, adapté aux événements, à l'expérience et au profil personnel des pilotes est présentée ensuite brièvement.

Densité de surveillance par le pilote au sol, selon les phases de vol

La densité des" menaces externes au cockpit" rencontrées typiquement au cours d'un vol de 1,7 h est représentée sur la Figure 12 pour chaque phase de vol et le roulage au sol.

Les durées typiques des phases d'opérations depuis la préparation jusqu'à l'arrêt aux portes, sont rappelées au préalable dans la Table 5 (ci-dessous). Les taux d'accidents mortels pour chaque phase du vol au cours de la dernière décennie, sont tirés principalement de la Réf 2 et rappelés dans la Table 6.

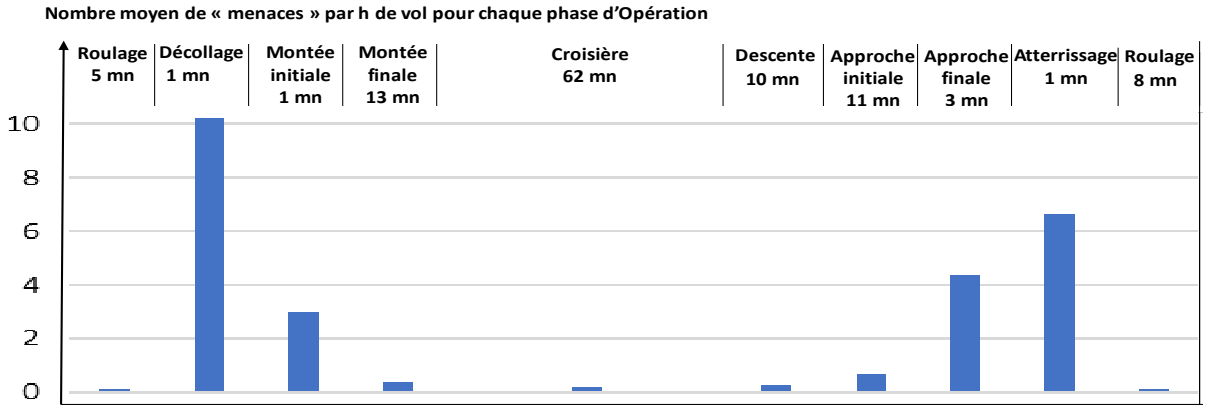
Table 5 : Durées typiques des d'opérations depuis la préparation jusqu'à l'arrêt aux portes

Opérations	**Durée (en mn)**
Préparation du poste	30
Mise en route/départ de la porte	10
Roulage	5
Décollage	1
Montée initiale	1
Montée (finale)	13
Croisière	62
Descente	10
Approche initiale	11
Approche finale	3
Atterrissage	1
Roulage jusqu'à l'arrêt aux portes	8
Total	155 mn (dont 102 mn de vol)

Le taux moyen d'accidents mortels au niveau mondial au cours de la dernière décennie, toutes phases confondues, est de 0,37 par M d'heures de vol (jets et turbopropulseurs de transport de passagers et cargos de plus de 5,7 t). En phase de croisière, il n'est que de 0,12 par M d'heures de vol.

Avec l'hypothèse réaliste que le taux moyen de "menaces externes au cockpit" pour chaque phase du vol est proportionnel au taux moyen d'accidents constaté aujourd'hui ou potentiel pour chacune de ces phases de vol, on obtient le profil de densité de « menaces externes » au cours d'un vol de durée typique 1,7h, comme indiqué sur la Figure 12 et rappelé dans la Table 6

Figure 12 : Densité des menaces externes au cours d'un un vol de durée typique 1,7 heure (Données moyennes pour la dernière décennie tirées principalement de la Réf 2 pour les nombres d'accidents et ramenées à la durée moyenne typique des phases de vol correspondantes)



Outre le nombre moyen de menaces par phase d'opération et par heure de vol dans chaque phase, la Table 6 donne (colonne de droite) la valeur calculée selon l'approche faite dans la 1ére partie du Livret, du délai maximum entre deux vérifications par le sol de la capacité physiologique du pilote (période d'échantillonnage de la surveillance). Contrairement à la valeur moyenne présentée dans cette première partie du Livret, elle est définie ici pour chaque phase de vol et de roulage au sol. Elle répond à des critères de limitation de l'impact de la période d'échantillonnage sur le taux d'accidents mortels à typiquement moins de 10^{-9} / h de vol.

De façon pragmatique ce critère a été appliqué comme suit ;

- Phases de vols de durée supérieure à 10% de la durée totale du vol : moins de 10^{-9} / h de vol dans la phase considérée
- Phases de vol de durée inférieure à 10% de la durée du vol : contribution au taux d'accident sur l'ensemble du vol < 10^{-10} / h de vol

Table 6 : Période d'échantillonnage de la surveillance par le sol de la capacité physiologique du pilote pour chaque phase d'opération

Opérations	Nombre moyen de menaces par phase d'opération	Nombre moyen de menaces par heure de vol dans chaque phase	**Période d'échantillonnage maximum (en minute)**
Roulage	0,01	0,12	**(*)**
Décollage	0,17	10,2	**Contact continu**
Montée initiale	0,05	3,0	**Contact continu**
Montée (finale)	0,08	0,37	**> 12**
Croisière	0,17	0,17	**> 30**
Descente	0,05	0,3	**> 16**
Approche initiale	0,12	0,65	**> 4**
Approche finale	0,22	4,4	**Contact continu**
Atterrissage	0,11	6,6	**Contact continu**
Roulage jusqu'à l'arrêt aux portes	0,02	0,15	**(*)**

(*) Valeur supérieure à la durée de la phase correspondante

Le contact continu entre le pilote au sol et le pilote à bord pendant les phases de vol avec une densité de menaces élevée (de fait : à proximité des aéroports) permet au pilote au sol d'apporter un support, notamment pour :

- L'appréciation de la situation et la Prise de décision
- La maitrise des repères de position de l'avion
- (Dans une moindre mesure) Le suivi des actions et l'identification des omissions

Pendant les autres phases de vol (croisière, …) un contact doit aussi être établi pour permettre une assistance par le pilote au sol en cas de menace à la sécurité du vol identifiée depuis le bord ou depuis le sol.

Organisation du suivi par les Pilotes au sol

On développe ici les remarques préliminaires faites dans la 1ére partie 1 du Livret : « *Pour des raisons économiques, il n'est pas envisageable d'avoir en permanence un opérateur sol en support de chaque vol. Hors situation critique sur l'un des vols, chaque opérateur sol aurait donc l'obligation d'assurer de façon séquentielle le suivi et le support pour plusieurs vols. Lors de chaque intervention en support ou en substitution d'un pilote à bord, il aurait l'obligation d'acquérir ou d'actualiser (dans un délai compatible avec l'évolution de la situation) à un niveau plus ou moins détaillé selon l'état des capacités physiologiques du pilote, sa connaissance des ressources et du contexte propres à l'avion et à son environnement. Dès lors, l'un des facteurs clés de l'organisation des supports sol est la capacité humaine, en termes de flexibilité, rapidité et fiabilité, à intégrer ou à mettre à jour cette connaissance avant d'intervenir effectivement et sans risque de confusion pour l'assistance nominale comme pour la reprise éventuelle de la gestion du pilotage d'un avion* ».

Options d'organisation du suivi

Les trois options principales d'organisation du suivi par les pilotes au sol sont :

- le suivi par Vol : chaque vol est suivi du départ à l'arrivée par le même pilote au sol, (Voir Fig. 13)

- le suivi par "zone géographique" de vol : les pilotes au sol interviennent chacun dans une zone géographique déterminée.

- Un mélange des deux options précédentes favorisant par exemple le recours au suivi par zone géographique autour des grands aéroports, et le recours au suivi par vol dans tous les autres cas.

Les pilotes au sol sont toujours affectés au suivi d'avions dont ils connaissent parfaitement les caractéristiques génériques et de type.

Les conséquences et contraintes associées pour chacune des trois options d'organisation ci-dessus sont évoquées dans la Table 7.

Figure 13 Illustration d'un « suivi par vol » : Contacts nominaux à l'initiative du pilote au sol le long d'un vol typiquement de 1,7 h

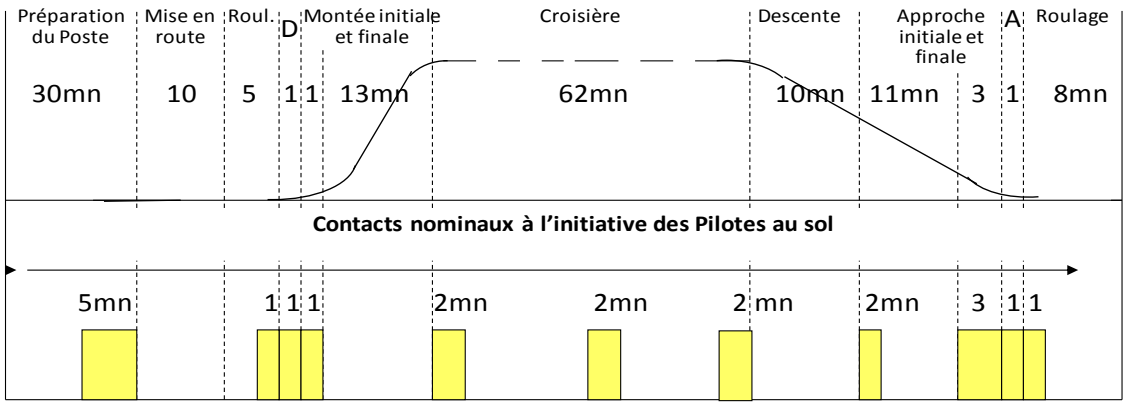


Table 7 Comparaison des 3 types principaux d'organisation du suivi par les pilotes au sol

Organisation du Suivi par les Pilotes au Sol	Liens de communications	Remises à niveau des Pilotes au sol	Localisation géographique des Centres Support Sol	Enchaînement des activités et qualité de relations sol-bord
1 Par vol : Le même pilote au sol tout au long du vol (du départ à l'arrivée)	. Nécessité de Liens sécurisés haut débit sur de longues distances	Favorable pour la connaissance du "contexte et des ressources" du vol et pour le suivi "personnel" du pilote à bord tout au long du vol"	. Possibilité d'avoir un seul lieu géographique	. Favorable pour la flexibilité d'enchaînement des activités des pilotes au sol et pour la coopération "pilote au sol-pilote à bord"
2 Par zone géographique : exemples : Un grand aéroport, plusieurs aéroports régionaux, plusieurs zones de vols en croisière, ...	Conditions optimales si les Centres Support Sol sont aussi répartis par zone géographique	Favorable pour la connaissance de "l'environnement" (trafic aéroport, menace météorologique locale, ...)	Localisations multiples si les liens directs (sans relai par satellite) de télécommunications doivent être favorisés.	Défavorable pour l'enchaînement des activités des pilotes au sol si les Centres sont multiples et spécialisés. Création de binômes pilote au sol- pilote à bord différents pour chaque sous partie du vol.
3 Combinaison des deux options précédentes	Possibilité de privilégier, selon la phase de vol, la connaissance par le pilote au sol : soit de l'environnement du vol lorsque celui-ci est complexe (zone autour d'un grand aéroport par exemple) soit du contexte du vol, des ressources et du pilote à bord.			

(*) Note : Les vols longs courriers ne sont pas pris en compte ici puisque l'on a considéré que pour ces vols, il resterait nécessaire d'avoir au moins deux pilotes à bord, les deux pilotes restant actifs dans des rôles respectivement de Commandant de bord et de Copilote durant les phases de décollage et d'atterrissage et lors de l'apparition de menaces externes.

L'option 3 permet très probablement de faire un bon compromis vis à vis de la qualité du suivi de l'état physiologique des pilotes à bord, la facilité de remise en situation des pilotes au sol à chaque intervention, et la souplesse d'enchaînement des suivis.

Compte tenu de la nécessité d'une coopération étroite entre pilotes sol et bord et d'un partage de responsabilité pour le pilotage, les pilotes au sol devraient vraisemblablement être recrutés, formés et gérés par chaque compagnie aérienne comme dans le cas des pilotes à bord, avec potentiellement des rotations entre les deux activités, (ceci en supposant que la mise en œuvre du transport aérien commercial s'effectue avec les mêmes schémas généraux d'organisation qu'aujourd'hui). Chaque compagnie aérienne devrait donc organiser ses propres Centre(s) Support Sol et ses propres équipe(s) de pilotes au sol.

Hiérarchie des décisions entre pilotes bord et sol

La hiérarchie des décisions entre pilotes bord et sol mérite une attention particulière puisqu'en certaines circonstances le pilote à bord peut se voir dénier la responsabilité du vol.

Le schéma proposé ici en première analyse définit cette hiérarchie comme suit :

- Cas nominal : le pilote à bord a normalement autorité sur le pilote au sol et sur la machine comme le commandant de bord dans un équipage de deux pilotes aujourd'hui
- En cas de détection par la machine d'une défaillance du pilote à bord ou d'une anomalie significative dans le management du vol, celle-ci génère une alerte vers le sol et engage le système de sauvegarde avec pilotage autonome, voire les protections enveloppe du vol, sans possibilité de reprise directement par le pilote à bord
- Le pilote au sol peut dans ce dernier cas autoriser la reprise en main par le pilote à bord
- Lorsque le pilote sol constate une nécessité de prise de responsabilité du pilotage depuis le sol, il fait appel à un second pilote au sol ayant autorité pour analyser et confirmer cette nécessité et pour mettre effectivement en œuvre le management du vol depuis le sol.

Illustration de la mise en œuvre du support sol et contraintes sur les liens de communications

Un scénario de mise en œuvre du support sol au cours d'un vol est donné ici à titre d'illustration. Il correspond à un suivi "par vol" depuis l'initialisation du vol jusqu'à la fin de la phase de croisière et par "zone géographique" depuis le début de la descente jusqu'à la fin du vol.

On tient compte de façon globale, dans cette illustration, des différentes fonctions du support sol définies précédemment :

- vérification et suivi de l'état physiologique du pilote, avec capacité d'engagement immédiat du mode de sauvegarde avec pilotage autonome de l'avion en cas de constat de défaillance sévère ou totale du pilote à bord, suivi de la prise en charge de la responsabilité du pilotage depuis le sol.

- (hors constat de défaillance sévère ou totale) assistance au pilote à bord pour la surveillance, l'acquisition du contexte et la prise de décision, durant les phases critiques du vol, voire durant l'ensemble du vol en cas de constat de défaillance physiologique légère.

Au cours du vol :

- Un premier pilote au sol (pilote au sol 1) acquiert les éléments de contexte du vol et de ressources spécifiques de l'avion lors de la phase de préparation du vol. Il assure ensuite la responsabilité du suivi jusqu'à la fin de la *phase de croisière*.

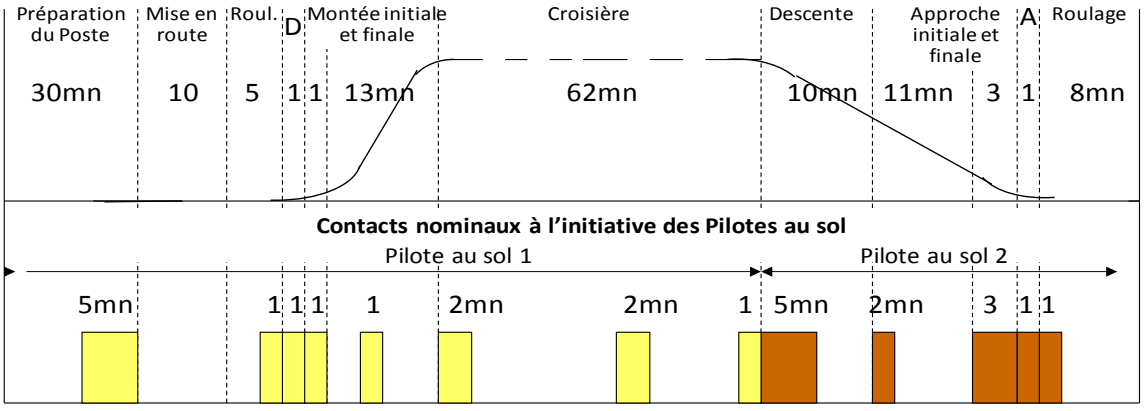
- Un second pilote au sol (pilote au sol 2) assure la responsabilité du suivi depuis le début de la *phase de descente* jusqu'à l'*atterrissage* et le début du *roulage*

Dans les rares cas de défaillance physiologique sévère ou totale du pilote à bord, le pilote au sol fait appel à un autre opérateur au sol, pour le seconder.

Opérations et contraintes temporelles

On illustre ici les contacts entre les pilotes au sol et à bord.

Figure 14 : Répartition et durée des contacts nominaux entre les pilotes au sol et le pilote à bord pour un vol typique de 1,7 h.



On distingue 3 sous-ensembles de phases d'opérations selon l'urgence de réactivité. Les contraintes temporelles indiquées ci-après sont à valider.

Phases de préparation, décollage et montée initiale et phases d'approche finale, atterrissage et début du roulage.

Les liens de communication entre l'avion et le sol notamment pour les échanges d'information de pilotage introduisent un retard maximum de 0,5 sec dans chaque sens (avion vers sol et sol vers avion).

Le pilote au sol 1 est en contact exclusif avec l'avion et le pilote à bord : pendant 5 mn lors de la fin de la préparation au vol, puis 1 mn pendant la phase de décollage et 1 mn pendant la montée initiale. Le pilote au sol 2 est en contact exclusif avec l'avion et le pilote à bord : pendant 3 mn lors la phase d'approche finale et 1 mn pendant l'atterrissage. Il garde le contact pendant 1 mn après l'atterrissage (début de la phase de roulage).

Le pilote au sol assure lors des contacts un rôle « d'assistant » auprès du pilote à bord et se tient prêt à intervenir directement en cas de défaillance physiologique. Un lien de communications à haut débit est établi en permanence entre l'avion et le poste de travail de l'opérateur sol.

Durant les phases de décollage et de montée initiale, le pilote au sol 1 a une connaissance du contexte, des ressources et de l'environnement, acquise avant le décollage.

Durant les phases d'approche finale, d'atterrissage et de roulage le pilote au sol 2 a une connaissance du contexte, des ressources et de l'environnement, acquise au début de la phase de descente.

En cas de détection d'une perte sévère ou totale de capacité physiologique du pilote à bord, le pilote au sol effectue de façon similaire à un copilote :

- la prise de décision (le cas échéant) de transfert de la responsabilité du vol vers la machine (allocation : quelques secondes)

- La prise en charge effective (surveillance ou reconfiguration) du pilotage depuis le sol (allocation : quelques secondes)

Phase de montée finale, et phases de descente et d'approche initiale

Le pilote au sol 1 prend contact avec le pilote bord typiquement une fois (durée : ~ 1 mn dans les cas nominaux) au cours de la phase de montée finale pour s'assurer du bon déroulement des opérations. Il intervient comme assistant si une situation de menace externe est signalée par le pilote ou les autres services sol. De même le pilote au sol 2 prend connaissance du contexte de l'avion et de l'état physiologique du pilote au début de la phase de descente (durée : 5 mn) puis une fois (durée : 2 mn) au début de la phase d'approche initiale. Il intervient comme assistant si une situation de menace externe est signalée par le pilote ou les autres services sol.

Pendant l'ensemble de ces phases un des membres du personnel de cabine peut rester en vigilance auprès du pilote pour envoyer instantanément une alerte au sol en cas de constat de défaillance physiologique.

En cas de détection d'une perte sévère ou totale de capacité physiologique, le pilote au sol effectue :

- la commande de passage instantané en mode sauvegarde avec pilotage autonome de l'avion (si ce mode n'a pas déjà été engagé automatiquement à bord),

- la reconfiguration du lien de communications haut débit qui permettra d'assurer la responsabilité du pilotage depuis le sol (allocation : 0 mn ou 1 mn selon les cas). On considère que ce lien haut débit doit être établi en permanence pendant au moins la première moitié de la phase de montée et la deuxième moitié de la phase d'approche.

- le rafraîchissement et l'approfondissement de la connaissance du contexte du vol, des ressources et de l'environnement : (allocation : 2 minutes)

- la prise de décision (le cas échéant) de transfert de la responsabilité du vol vers le sol (dans l'allocation de 2 minutes ci-dessus)

- La prise en charge effective du pilotage (surveillance ou reconfiguration du vol) depuis le sol (temps de préparation et d'envoi des premières commandes : 1 minute)

Les liens de communication (actifs) entre l'avion et le sol notamment pour les échanges d'information de pilotage introduisent un retard maximum de quelques secondes dans chaque sens (avion vers sol et sol vers avion)

Au total, entre la détection d'une défaillance physiologique du pilote et la prise en charge du pilotage par le sol le temps écoulé est au maximum de 4 minutes.

Phase de croisière

Le pilote au sol 1 reprend contact avec le pilote au début de la phase de croisière (durée : 2 mn) puis typiquement avec un délai maximum de 30 mn entre deux contacts (durée d'un contact : 2 mn), puis une dernière fois avant la descente (durée : 1 mn) juste avant de "passer la main" au pilote au sol 2. Il intervient comme "assistant" pendant la phase de croisière si une situation de menace externe est signalée par le pilote ou les autres services sol.

Il peut recevoir à tout moment un message d'alerte automatique ou en provenance d'un membre habilité du personnel de bord.

En cas de détection d'une perte sévère de capacité physiologique, le pilote au sol effectue (comme ci-dessus) :

- la commande de passage instantané en mode sauvegarde avec pilotage autonome de l'avion

- la reconfiguration de lien de communication : (allocation : 1 mn)

- le rafraîchissement et l'approfondissement de la connaissance précise du contexte spécifique de l'avion et de son environnement : (allocation : 5 minutes)

- la prise de décision (le cas échéant) de transfert de la responsabilité du vol : (incluse dans l'allocation ci-dessus)

- la prise en charge effective (surveillance ou reconfiguration) du pilotage depuis le sol : (temps de préparation et d'envoi des premières commandes : 2 minutes)

Les liens de communication entre l'avion et le sol notamment pour les échanges d'information de pilotage introduisent un retard acceptable de quelques secondes dans chaque sens (avion vers sol et sol vers avion) compatible d'une liaison via des relais de télécommunications en orbite géostationnaire.

Au total, entre la détection d'une défaillance physiologique du pilote et la prise en charge du pilotage par le sol le temps écoulé est au maximum de 8 minutes

Charge moyenne typique de travail des pilotes au sol au cours d'un vol

Dans l'illustration ci-dessus : pour un vol de durée moyenne 102 mn, nécessitant 155 mn d'opérations liées au pilotage, deux pilotes au sol seraient mobilisés comme indiqué sur la Figure 14.

Ainsi sur une durée totale d'opérations de l'ordre de ~155 mn entre la préparation du vol et l'arrêt des moteurs, la charge cumulée des deux pilotes au sol pour le suivi d'un avion serait d'environ 24 mn en cas de vol nominal. Cette charge serait augmentée de quelques minutes si une menace externe apparaissait pendant les phases de montée finale, croisière, descente ou approche initiale.

Il faudrait donc en moyenne l'équivalent de « 1 pilote au sol » pour ~5 vols si le nombre d'avions à suivre était suffisamment important pour permettre l'enchaînement des activités de ces pilotes au sol, en tenant compte de l'obligation de connaitre les caractéristiques génériques et/ou des types des avions.

Cette évaluation doit bien évidemment être corrigée pour tenir compte de la perte de performance liée à la fatigue des pilotes au sol.

La charge supplémentaire induite en moyenne par les cas d'apparition ou de suspicion de défaillance physiologique des pilotes à bord reste très faible en valeur relative. Ainsi même si un doute apparaissait sur l'état physiologique des pilotes dans près de 1 cas sur 100, et qu'en conséquence l'équivalent d'un

pilote au sol était assigné à temps plein pour toute la durée des vols correspondants, la charge moyenne des pilotes au sol ne serait augmentée que de 5%.

Evolution du support sol après 5 à 10 ans d'opérations

Une mise en œuvre opérationnelle prudente pendant une période initiale de 5 à 10 ans du pilotage avec un seul pilote à bord, telle que celle illustrée ci-dessus, permettrait, tout en limitant le risque d'accidents, d'acquérir de l'expérience pour l'organisation et la mise en œuvre des supports sols et pour la gestion des cas critiques. Elle permettrait aussi d'identifier les besoins spécifiques de formation des pilotes et des opérateurs sol pour les nouveaux modes de coopérations à distance.

Une attention particulière devrait être portée à la détection en temps réel des défaillances physiologiques des pilotes, ainsi qu'à la caractérisation à priori du niveau de risque de défaillance de chaque pilote au début de chaque vol sur la base du profil personnel long terme et des informations recueillies lors des échanges avec le pilote au sol pendant la préparation du vol.

Il semble raisonnable d'anticiper une possibilité de réduction de la densité du support sol après 5 à 10 ans d'opérations. L'assistance sol pourrait alors être définie comme suit :

- Le niveau minimum de surveillance et d'assistance au pilote à bord est défini préalablement au vol par la compagnie, sur la base du contexte et de l'environnement du vol (météo, trafic, ...) et de l'expérience et du profil personnel du pilote.

- Les échanges avec le pilote à bord pour la préparation du vol ont lieu comme dans l'illustration précédente. Sur la base de cet échange, l'opérateur décide de la densité de contact et du niveau d'assistance à fournir effectivement tout au long du vol (en l'absence d'alerte imprévue)

Sur la durée totale d'opérations de l'ordre de ~155 mn entre la préparation du vol et l'arrêt des moteurs, la charge totale des deux pilotes au sol pour le suivi d'un avion serait d'environ 17 mn en cas de vol nominal.

Il faudrait en moyenne l'équivalent de «1 pilote au sol » pour ~7 vols.

Dans cette approche, les pilotes au sol doivent pouvoir adapter leurs interventions à des circonstances variables d'une heure à l'autre (trafic, expérience des pilotes à bord des avions, ...), d'un jour à l'autre, ou d'une saison à une autre (météorologie).

Nature, volume liens et débit des informations à transmettre via les de télécommunications

On s'intéresse ici aux communications spécifiques au pilotage avec un seul pilote à bord, c'est à dire à celles qui ne seraient pas mises en œuvre lors du pilotage avec un équipage de 2 pilotes à bord. On ne considère donc pas, par exemple, les échanges relatifs à la météo qu'il s'agisse de l'envoi d'informations depuis le sol vers l'avion ou du transfert des informations recueillies à bord vers le sol.

Dans les cas nominaux, c'est à dire en l'absence de défaillance physiologique déclarée ou observée, le pilote au sol doit surveiller l'état physiologique du pilote à bord. Il doit de plus l'assister dans une fonction de type "assistant "lors des phases critiques du vol.

Dans les cas de défaillance du pilote à bord, l'opérateur sol doit assurer le contrôle et la gestion du pilotage de l'avion avec les contraintes de bandes passantes différentes selon les phases de vol comme indiqué dans la 1ére partie du Livret.

Globalement les communications doivent répondre à quatre types de besoins :

- *Contrôle du trafic aérien :* les informations normalement échangées entre les services au sol et le pilote à bord, doivent obligatoirement, en cas de défaillance du pilote à bord, transiter par le Centre de Support Sol dans lequel opère le pilote au sol. L'avion sert alors de relai de communications. Les contraintes sur les liens entre le Centre de contrôle de trafic aérien et l'Avion s'appliquent aux liens entre l'Avion et le Centre de Support Sol. En l'absence de défaillance physiologique du pilote les échanges entre ce pilote et les services sol doivent aussi être transmis au pilote au sol lorsque celui-ci intervient comme assistant.

- *Contrôle et surveillance du pilotage* **:** Les informations montantes du Centre de Support Sol vers l'avion permettent d'assurer depuis le sol, en cas de besoin, la responsabilité du pilotage de l'avion. La fréquence et le débit de données requis sont très variables selon le degré d'autonomie de l'avion dans chaque phase de vol. Les informations descendantes donnent au pilote au sol un sous ensemble ou l'ensemble complet des données d'affichage du cockpit normalement disponible au pilote à bord. Des informations complémentaires normalement captés par les organes sensoriels du pilote à bord peuvent aussi être transmises. Le besoin d'informations vidéo sur l'environnement de l'avion est lié aussi à la fonction *Alerte &Evitement*. Les débits de données associés à la vidéo sont généralement importants et donc les exigences plus ou moins subjectives relatives au champ de vue et à la résolution doivent être minimisées.

- *Alerte &Evitement* **:** Le niveau d'autonomie de l'avion pour cette fonction va probablement beaucoup progresser au cours des prochaines décennies. Cependant une surveillance sol ainsi qu'un ajustement des modes et paramètres d'opérations du système embarqué selon les conditions d'environnement, resteront probablement nécessaires en cas de défaillance physiologique du pilote à bord. Une voie de données montante à faible débit et une voie descendante à potentiellement fort débit (vidéo notamment) sont donc à prévoir.

- *Observation et Surveillance du cockpit* **:** L'observation de l'intérieur du cockpit par voie vidéo (en plus des échanges audio) est utile dans le cas du pilotage avec un seul pilote à bord pour l'observation par le pilote au sol du comportement du pilote à bord et donc de son état physiologique. Elle est strictement nécessaire en cas d'intervention d'un membre du personnel de cabine comme auxiliaire pour l'affichage de consignes définies par l'opérateur sol.

On fera l'hypothèse réaliste qu'il n'y aurait jamais besoin de transmettre simultanément les vidéos : "cockpit" d'une part et "environnement" d'autre part, ce qui limite le débit maximum de données requis.

Les estimations faites actuellement pour les drones montrent que hormis les transferts de vidéo (de l'avion vers le sol) et les échanges de données météo, les capacités exigées pour les débits de données restent faibles, de l'ordre de quelques kbits/sec. Le transfert de données vidéo (drone vers Centre de Support Sol) pour les phases critiques de vol (proches des aéroports) requiert une capacité de l'ordre de 200 kbits/s avec l'hypothèse d'une transmission d'images standard de 720x480 pixels à une cadence de 5 images par secondes et avec la technologie de compression vidéo d'aujourd'hui.

Dans le cas de notre analyse relative au transport de passagers, il est possible que les exigences combinées de "champ de vue" et de "résolution" de la vidéo pour les fonctions *"Alerte &Evitement*" et "contrôle et surveillance" conduisent à des images avec significativement plus de 0,5 Mpixels. A titre d'exemple pour les simulateurs de pilotages de niveaux 2 et 3 (Full Flight Simulators) l'exigence de restitution de la vision correspond à des images d'environ 6 Mpixels.

Compte tenu de l'horizon de mise en œuvre du pilotage avec un seul pilote on considère qu'une provision de 500 kbits/s à 600 kbits/s est suffisante pour permettre le transfert d'images de très haute résolution grâce à la mise en œuvre de techniques de compression intelligentes adaptées au besoin.

Les liaisons de communications haut débit permettant la reprise rapide du pilotage depuis le sol doivent être nominalement établies, dès la prise de fonction de l'opérateur sol et jusque vers la moitié de la phase de montée, puis depuis la moitié de la phase d'approche initiale jusqu'au roulage, soit pendant ~40 mn pour chaque vol de durée moyenne 1,7 h. Le débit de communications est de quelques 100 kbits/s pour la voie descendante (avion sol) et de quelques 10 kbits/sec pour la voie montante.

Les liaisons de communications pour la seule surveillance de l'état physiologique du pilote sont à établir de façon périodique pendant la phase de croisière soit pendant un temps cumulé de l'ordre de 10 à 15 mn. Le débit de communications est de quelques kbits/sec dans les sens montant et descendant avec un débit supplémentaire descendant (vidéo) d'une centaine de kbits/s à la demande du pilote au sol (maximum 10 à 15 mn).

Table 8 Disponibilité et utilisation des liens (additionnels) de communication entre l'avion et les centres support sol

	Nominal	**Management du vol depuis le sol (Liaison continue)**
Contrôle du trafic aérien (ATC)	*Transmission via l'avion des échanges « pilote bord-ATC » au pilote au sol : . Continue près des aéroports . Disponible à tout moment pendant le reste du vol*	*Lien via l'avion entre ATC et pilote au sol : Contraintes identiques aux liaisons nominales ATC-pilote à bord*
Détection et évitement	*. Lien continu près des aéroports . Disponible pendant le reste du vol (délai d'établissement de la liaison <1mn en phase de croisière)*	*. Pilote sol vers Avion : débit de qcq dizaines de Kb/s . Avion vers pilote au sol : Vidéo < 500 Kb/s*
Management du vol	*Débit : qcq dizaines de Kb/s ; Temps de latence : 1 à 2 s hors phase de croisière et 5 à 10 s en phase de croisière*	
Observation des capacités physiologiques	*Audio et Vidéo du Cockpit pendant les périodes d'échanges : <100Kb/s*	*Audio et Vidéo du Cockpit : < 500Kb/s (vidéo soit cockpit soit détection et évitement à chaque instant)*

Exigences de disponibilité des liens de communications

L'exigence de disponibilité des liens de communications exprimées dans la partie 1 du document avec l'hypothèse d'un taux uniforme de menaces sur l'ensemble du vol, peut être exprimée pour chaque phase de vol en tenant compte de la répartition des menaces au cours du vol comme définie dans la Fig. 12. Afin de limiter l'impact des pertes de disponibilité des communications à moins de 10^{-9} accidents mortels /h de vol :

- les liaisons de communications doivent être disponibles, sans interruption significative pendant les phases de décollage et d'atterrissage, dans au moins 99,8% des cas".

- les liaisons de communications doivent pouvoir être établies et rester disponibles (sans interruption de plus d'une dizaine de secondes) durant les phases de croisière, sur des durées de 5 à 15 mn dans au moins 90% des cas.

Synthèse et recommandations

On a tenté, dans cette 2éme partie du Livret 5, de définir les exigences majeures relatives au support sol pour assurer la sécurité des vols dans le cas d'un pilotage avec un seul pilote à bord. On a illustré aussi l'enchaînement typique et la densité des interventions des pilotes au sol au cours d'un vol de durée moyenne typiquement de 1,7h.

Plusieurs hypothèses très dimensionnantes ont dû être faites sur un plan quantitatif, notamment sur :

- les modes et les statistiques de défaillances physiologiques des pilotes,

- les performances individuelles nominales (hors défaillance physiologique) des pilotes à bord selon leurs niveaux d'expérience,

- les réactions personnelles des pilotes seuls à bord, lors de situations exceptionnelles imprévues.

Il est important de recueillir de nombreuses données supplémentaires pour permettre une réelle analyse statistique de la sécurité des vols selon les moyens et procédures mis en œuvre dans le cas d'une évolution vers un pilotage avec un seul pilote à bord.

Par ailleurs l'intérêt économique d'une évolution vers un pilotage avec un seul pilote à bord reste à confirmer. Il serait donc utile d'analyser précisément les schémas d'organisation globale des supports sols en répondant à un certain nombre d'interrogations, notamment :

- la formation spécifique des pilotes à bord (individuelle et en relation avec les pilotes au sol),

- la qualification des pilotes au sol,

- la responsabilité de recrutement, de formation, de qualification et d'encadrement des pilotes au sol,

- le déploiement géographique, au plan régional et mondial des services au sol avec les conséquences pour les spécialisations des opérateurs d'une part et pour les liens de communications d'autre part

- les relations des nouveaux services sol avec les autres services aéronautiques.

Quelques recommandations importantes sont formulées ci-après en complément de celles formulées à la fin de la 1ére partie du Livret 5 :

- Analyser les forces et faiblesses potentielles d'une coopération entre un pilote à bord et un pilote au sol en position de support (nominalement de type "assistant"). Confirmer les contraintes de délai et de latence sur les communications selon les phases de vol.

- Mesurer la capacité des opérateurs sol à intervenir efficacement de façon séquentielle en support de différents vols et en particulier analyser le temps de remise à niveau pour la prise de responsabilité du pilotage, selon le type d'organisation retenu.

- Esquisser des schémas d'organisation globale des supports sols, respectant les impératifs de sécurité des vols afin d'analyser préliminairement l'intérêt économique.

Références

1 Matthew J W Thomas *University of South Australia Adelaide, Australia*

Improving organisational safety through the integrated evaluation of operational and training performance: an adaptation of the Line Operations Safety Audit (LOSA) methodology.

2 *Civil Aviation Authority 2013* CAP 1036 Global fatal Accident 2002 to 2011

3 Jean Pinet Ancien pilote d'essais expérimental, Thèse de l'Université de Toulouse en Psychologie spécialité Ergonomie : Juin 2011 : Traitement de situations inattendues d'extrême urgence en vol : test d'un modèle cognitif auprès de pilotes experts

4 Charles A. DeJohn, Alex M. Wolbrink , Julie G. Larcher Civil Aerospace Medical Institute Oklahoma City "Pilots physiological deficiencies: In flight Medical Incapacitation and impairement of US Airline pilots 1993 to 1998".

5 Robert L. Helmreich, James R. Klinect, & John A. Wilhelm, University of Texas Team Research Project. The University of Texas at Austin Department of Psychology Austin, Texas USA Models of threat, error and CRM Flight Operations

6 A practical guide for improving Flight path monitoring Nov 2014 Flight Safety Foundation

7 Boeing 2013, Statistical summary of commercial jet airplane accidents, Worldwide operations 1959/2013

8 Airbus 2014, Commercial Aviation Accidents 1958-2014, A Statistical Analysis

9 Académie de l'Air et de l'Espace Avril 2013 "Comment volerons-nous en 2050 ?

10 Rapport IATA : Résultats en matière de sécurité en 2014

11 Jean-Georges MOUCHARD, Médecin, Directeur du Centre d'Expertise Médicale du Personnel Navigant de Toulouse Blagnac. Discours de réception à l'Académie de l'Air et de l'Espace, 28 Nov 2014

12 Programme ASTRAEA Astraea consortium en UK

Annexe : Cas des Vols long-courriers avec un seul pilote à bord

Une première étape de réduction du nombre de pilotes à bord des avions pour les vols long-courriers pourrait consister en un pilotage avec un seul pilote en fonction à bord pendant les phases de croisière notamment, hors périodes de menaces externes critiques. Pendant ces phases, un support sol pourrait être mis en œuvre, comme dans l'approche décrite dans le Livret 5 pour les vols court et moyen-courriers avec un seul pilote à bord, pour la détection de défaillances physiologiques et les actions immédiates de sauvegarde. Le pilote au repos pourrait alors se substituer au pilote en fonction pour la prise de responsabilité du pilotage en cas de nécessité reconnue à bord ou depuis le sol.

Nous nous intéressons dans cette annexe à une évolution potentielle plus lointaine consistant à n'avoir effectivement plus qu'un seul pilote à bord, en fonction systématiquement pour toutes les phases hors celle de croisière, et « au cas par cas » pour le management de certaines menaces à la sécurité du vol en phase de croisière. Le management du vol serait alors assuré entièrement depuis le sol pendant la phase de croisière, hormis en cas d'apparition de certains types de menaces justifiant l'interruption du repos du pilote à bord.

La sécurité du vol pendant toutes les phases, hormis celle de croisière, serait assurée comme dans le cas des vols court et moyen-courriers avec un seul pilote à bord et avec le support d'un pilote au sol.

Durant la phase de croisière :

- Une surveillance continue devrait être assurée depuis le sol.

- Le management des menaces externes les moins critiques pourrait être fait depuis le sol sans interrompre le repos du pilote à bord.

- Le management des menaces les plus critiques, justifiant l'interruption de son repos, pourrait être assuré par le pilote à bord assisté par le pilote au sol.

Avec un nombre moyen de typiquement 0,2 à 0,5 menaces selon les types de vol pendant la phase de croisière, dont ~ 50% provenant de l'extérieur de l'avion (météorologie par exemple) et 50% provenant de l'avion lui-même (panne d'un équipement, problème avec les passagers, …) ou des interfaces de communications, le repos du pilote pourrait être interrompu en moyenne 1 à 3 fois tous les 10 vols.

Compte tenu des disparités des nombres moyens de menaces durant les phases de croisière selon les destinations desservies et les saisons, il est vraisemblable qu'une discrimination devrait être faite selon les lignes. Le besoin de formation de jeunes pilotes pourrait être mis à profit pour adapter le nombre de pilotes à bord aux différents cas.

La charge de travail moyenne d'un pilote au sol pour le suivi de chacun des avions pendant la phase de croisière serait assez faible. Il est donc envisageable de confier, par exemple, à une équipe de deux pilotes au sol le suivi de plusieurs avions pendant cette phase (6 à 8 ?).

Livret 6 : APPORT de l'EXPERIENCE des DRONES dans le CONTEXTE d'une AVIATION plus AUTOMATIQUE, INTERCONNECTEE

Alain JOSELZON (Membre de l'AAE)

Résumé

Introduction

Les drones sont en plein essor, leurs applications et capabilités croissent très rapidement. Les applications militaires déjà très développées à la faveur des progrès technologiques soutenus par des moyens de recherche importants. Les progrès des performances opérationnelles offrent des solutions complémentaires ou de substitution attrayantes à l'aviation traditionnelle, pour diverses missions (surveillance, reconnaissance, guidage, attaques ciblées,). Ces progrès ont stimulé le développement des drones civils, qui ne cessent de se répandre pour des missions spécifiques très variées. Les retombées technologiques des drones militaires vers le domaine civil, les synergies combinées aux effets d'une mise en œuvre facile et de coûts réduits des « petits drones », dynamisent l'ensemble du tissu industriel et du marché des drones, profitant finalement à toute la filière aéronautique. Les drones de plus en plus performants se rapprocheront des autres aéronefs, dans un processus convergent.

L'essor des drones amène à se poser de nombreuses questions, notamment :

- *quelle place les drones occupent-ils / occuperont ils dans le transport commercial civil ?*
- *qu'est-ce qui peut les rendre le plus utile, le plus efficace et le moins pénalisant possible ?*
- *les drones préfigurent-ils l'étape ultime d'une aviation plus automatique ?*

Pour répondre à ces questions et évaluer l'apport de l'expérience des drones dans le contexte d'une aviation plus automatique et interconnectée à l'horizon 2050, il paraît opportun de :

- prendre en compte le grand écart actuel entre drones civils et aéronefs de transport,
- évaluer l'impact potentiel des drones civils sur le transport de passagers,
- évaluer l'apport potentiel spécifique des drones militaires au transport de passagers,
- anticiper les différentes utilisations de drones dans l'espace aéronautique
- examiner les retombées technologiques des drones sur le transport de passagers,

D'où la démarche engagée, examinant les apports des drones à partir des différentes applications.

Ecart entre petits drones civils actuels et aéronefs de transport commercial

Les drones civils actuels en opération ou en développement se distinguent des avions civils commerciaux par la taille et les objectifs de missions : le transport d'une charge marchande, à la différence d'un avion, n'est qu'une parmi de multiples autres missions des drones, ceci se combinant à leur capacité d'emport très réduite. Les drones jouent principalement un rôle de vecteur au service de l'acquisition-collecte-traitement de données, images et mesures ciblées en vue de diagnostics et aides à la décision, dans le cadre d'une solution globale offerte au client. On est donc *loin des caractéristiques, objectifs et contraintes d'utilisation de grands drones dans l'aviation commerciale, notamment en termes d'exigences de fiabilité et sécurité.*

Interdépendances entre problématiques des drones actuels et du transport aérien

Malgré l'écart évoqué ci-dessus, les petits drones ne peuvent être ignorés dans le trafic aérien, en raison des interférences accidentelles ou intentionnelles avec d'autres aéronefs : de nombreux cas de quasi-collisions ont déjà été signalés : les drones peuvent être perçus comme un problème à surmonter. *Deux facteurs cruciaux conditionnent l'insertion réussie des drones dans le trafic aérien : un partage optimisé de l'espace aérien et des systèmes efficaces de détection-évitement.*

Impact direct du "phénomène drone" sur le transport aérien de passagers

L'étude de l'hypothèse du passage de deux pilotes aujourd'hui à un seul ou zéro dans le futur dans le transport aérien commercial, a montré que si la réduction du nombre de pilotes à bord pouvait éventuellement réduire les coûts d'opérations, probablement sans répercussion notable sur les grands équilibres économiques et le marché, la présence d'au moins un pilote à bord des avions de transport commercial de passagers à l'horizon 2050 reste très probable, pour des raisons de sécurité. *Ceci, ajouté au grand écart entre drones civils actuels et avions commerciaux, rend improbables à nos yeux* ***des drones de transport de passagers à l'horizon 2050.*** *L'impact direct du « phénomène drone » se résume alors aux risques d'interférence entre les drones et le reste du trafic aérien, ce qui impacte l'ensemble de la réglementation et des questions de sécurité.*

Apport potentiel spécifique des drones militaires au transport aérien de passagers

Les drones militaires, du fait de leur taille, de leurs systèmes sophistiqués, des exigences spécifiques, liées à des missions et conditions d'utilisation difficiles, en milieu hostile : performance (rayon d'action et autonomie en particulier), résilience aux attaques matérielles ou cybernétiques, sont relativement plus « proches » des avions commerciaux que les petits drones civils actuels. Toutefois, sur la base des incidents/accidents rapportés sur les drones militaires opérationnels, leurs taux de fiabilité sont nettement inférieurs à ceux des avions commerciaux.

A titre d'exemple, l'avion sans pilote européen nEUROn[145] est porteur d'informations très intéressantes dans le contexte des drones civils, notamment sous les aspects : insertion/intégration, algorithmes de haut niveau des automatismes, place de l'humain dans la boucle, autonomie de mission, validation de technologies de commande/contrôle, modes de secours assurant le niveau de sécurité.

L'apport potentiel des concepts et des technologies développés dans le contexte militaire sur de « grands démonstrateurs » de plus en plus évolués sera amplifié par la proximité des problématiques, combinée avec l'importance des investissements militaires de R&D.

Utilisations de "l'espace aéronautique" à base de drones à l'horizon 2050

Transport de fret. Le fret représente une fraction notable du trafic aérien. Même avec des taux de croissance bien inférieurs à ceux du trafic passagers, on peut penser que le trafic de fret représentera encore une part significative du transport aérien futur.

Si le transport des passagers avec des drones est improbable à l'horizon 2050, pour le transport de marchandises, l'absence de pilotes, en libérant certaines contraintes, pourrait favoriser l'émergence de cellules adaptées. Le bilan devra être fait entre la souplesse actuelle d'utilisation des avions transportant à la fois passagers et fret, les possibilités de conversions d'avions, les avantages économiques liés aux réductions d'exigence et nouvelles opportunités de marchés offertes par les drones, les exigences de sécurité, enfin les implications d'une flotte optimisée d'avions de fret. *On ne peut exclure un changement de paradigme avec des drones capables d'assurer le transport de fret dans des conditions viables en termes de sécurité et d'économie.*

Des applications de *transport de charge matérielle à courte distance* ne sont pas exclues non plus.

---

[145] *Le nEUROn, initiative française gérée sous l'autorité de la DGA, qui a été rejointe par plusieurs gouvernements et industriels européens, est un projet de démonstrateur technologique d'un véhicule de combat aérien non piloté (UCAV – « Unmanned Combat Air Vehicle »), élaboré dans le cadre d'une coopération industrielle européenne, lancé en 2003 dans le but de démontrer la maturité et l'efficacité des solutions techniques. Dassault Aviation en est le maître d'œuvre.*

Transport privé de passager. Des applications *à courte distance (individuel ou familial pour le loisir ou l'accès au lieu de travail)* pourraient largement bénéficier de l'émergence des drones avec pilotage entièrement autonome.

Contraintes de "cohabitation" pour le transport de passagers. En lien avec les diverses applications évoquées, l'espace aéronautique pourrait supporter des développements de trafic importants à l'horizon 2050. Les interférences avec le transport de passagers seraient nombreuses aux abords des aéroports, nécessitant réglementations et protections. Les exigences de sécurité et fiabilité devront être satisfaites, avec des problématiques similaires à celles de la réduction de l'équipage des avions futurs (ex. : temps de réponse des communications), d'autant plus que le niveau de sécurité du transport aérien devra augmenter à l'horizon 2050. Le risque d'écrasement (dommages aux personnes et biens) devra être couvert, Des solutions du type trajectoires préprogrammées inspirées des applications militaires pourraient alléger certaines contraintes. D'une manière générale, *toute application future de drones dédiée au transport exigera des niveaux de fiabilité et sécurité opérationnels du même ordre que ceux des aéronefs pilotés à bord. La rentabilité économique globale devra être confirmée. Dans le contexte très évolutif actuel, et compte tenu des informations fragmentaires et incertaines pour le long terme, il est difficile d'approfondir ici les analyses de sécurité, de rentabilité économique et les études de scénarios.*

Autres applications. Un potentiel d'applications significatif existe dans le domaine des relais de télécommunications atmosphériques, de l'observation (météo, science, agriculture, végétation, surveillance, etc.), des mesures et des expérimentations dans l'atmosphère.

Retombées technologiques et méthodologiques des drones pour le transport aérien

On peut entrevoir des retombées multiples, liées aux progrès technologiques rapides des petits drones facilités par leur mise en œuvre simple et leurs coûts réduits, stimulés par les applications militaires. Ces retombées, souvent diffuses, d'ordre conceptuel, méthodologique, technologique et opérationnel, vont s'amplifier avec la montée en puissance des drones (nombre, taille, diversification, sophistication, équipements, automatismes, autonomie, systèmes) enrichir la connaissance dans des domaines aux problématiques similaires (autonomie, interfaces H-M, insertion dans l'espace aérien, détection et évitement, etc.), faciliter les pré-développements. En particulier les drones peuvent apporter des renseignements très importants sur les solutions d'insertion d'aéronefs plus automatisés, interconnectés dans le trafic (avec une certaine "autonomie" dans ce cas), car c'est un problème prioritaire qui se pose pour les drones : ceci concerne en particulier les systèmes de détection-évitement (concepts, capteurs, traitement des données, fonctionnement, etc.). L'expérience des drones peut aider entre autres à appréhender la question fondamentale : comment parvenir à faire en sorte qu'un aéronef non-coopératif puisse être rendu coopératif grâce aux moyens de détection et évitement, combinés avec tous les autres pouvant être mis à contribution (logiciels de traitement de données, échanges de signaux, etc.). Le traitement des questions de bande passante des signaux peut également donner lieu à des analogies/transpositions utiles entre drones et autres aéronefs.

Evolution possible vers des drones civils de grandes dimensions à l'horizon 2050

Les résultats de notre analyse des facteurs influents à travers leurs effets tendanciels (freins-stimulants), non-exhaustive, inapte à prendre en compte les imbrications multiples entre les divers facteurs, confirme, aux incertitudes près, la très faible probabilité que des drones de grandes dimensions contribuent significativement au transport aérien civil en 2050. Des drones de fret ne sont pas complètement écartés à cet horizon, sous réserve que soient levés les obstacles en matière de fiabilité-sécurité-sûreté, technologie, opérations, réglementation, économie et psychologie. *Le rôle des drones dans le pré-développement de solutions subsiste néanmoins.* **En termes de sécurité**, qui est sans doute un, sinon "le" facteur crucial, l'enjeu peut être schématisé par la figure 1 ci-dessous, où l'on projette dans le futur, d'une part la tendance asymptotique apparaissant dans les statistiques d'accidents d'avions

commerciaux actuels, et d'autre part, la tendance, supposée s'améliorer progressivement en ce qui concerne la sécurité des drones (RPAS), dans la perspective d'une utilisation possible pour des missions de transport commercial: on peut alors faire l'hypothèse d'un croisement *possible* des courbes à une date 20XX qui *reste évidemment dans le domaine spéculatif*. Il est vraisemblable que la tendance asymptotique telle qu'elle se manifeste pour les taux d'accidents d'avions affecterait aussi les taux d'accidents de drones à un stade ultérieur.

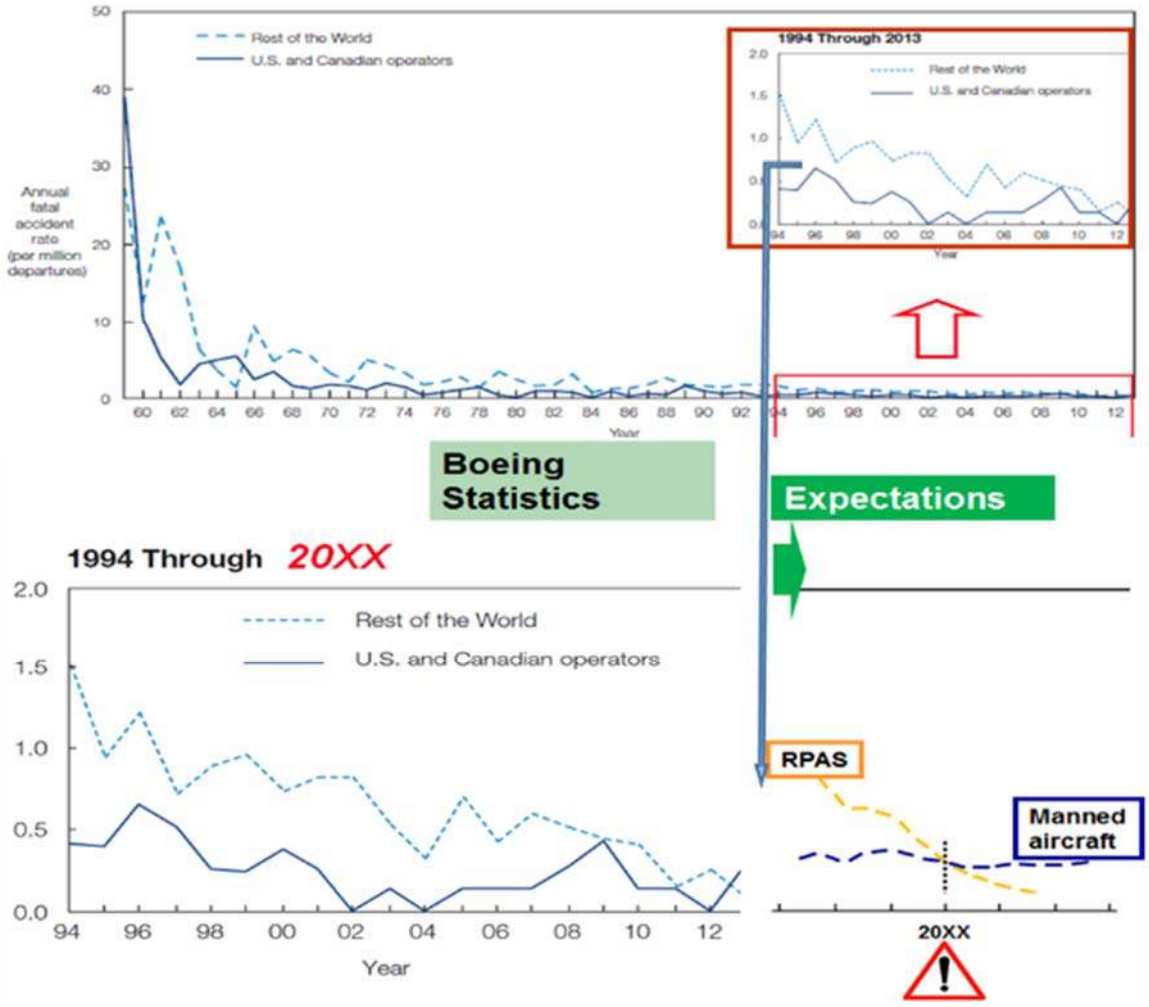


Figure 1 : sécurité des drones dans le futur (d'après C. Le Tallec - ONERA 2014)

Une telle évolution si elle se concrétisait, pourrait ouvrir des perspectives pour les drones civils dans un futur difficile à préciser, aussi bien en termes de dates que de conditions, mais il faut insister dans tous les cas sur la nature *spéculative* de cette approche.

Conclusions

Les petits drones civils actuels sont très éloignés de l'aviation de transport de passagers, et leur *impact potentiel direct* se limite dans ce secteur, aux risques d'interférences. Par ailleurs, le développement harmonieux des drones implique la levée de barrières d'ordre technique, réglementaire et sociétal. Toujours est-il que l'aviation civile est à l'aube de *changements profonds avec l'avènement de systèmes de plus en plus sophistiqués et automatisés. Il ne faut sous-estimer ni les conséquences imprévues, ni la difficulté d'intégrer les avancées technologiques en améliorant simultanément la sécurité et l'efficacité. Il est crucial de prioriser les activités de recherche aptes à relever ces défis,* liés notamment à l'essaimage des drones et à leurs niveaux de sécurité. *La situation très diverse et évolutive des drones, les critères de sécurité et le retour d'expérience font partie des éléments critiques à intégrer*.

L'apport potentiel des drones militaires, des technologies et applications duales, des développements conceptuels, méthodologiques, technologiques, opérationnels, l'utilisation éventuelle de drones pour le transport de marchandises à long terme, les effets-rebonds dans la recherche, l'industrie et la commercialisation, font entrevoir une consolidation / dynamisation de la filière aéronautique, *des bases de pré-développement idéales pour les automatismes futurs, à frais, délais et risques réduits, donnant aux drones un rôle unique de facilitateur de solutions techniques innovantes.* Leur essor est amorcé, tandis que l'aviation évolue vers plus d'automatisation, d'autonomie et d'interconnectivité, et que corrélativement, les fonctions de pilotage des aéronefs futurs vont devoir être repensées. Les problématiques des drones et des autres aéronefs vont s'imbriquer de plus en plus, et la réglementation devra les englober dans un ensemble cohérent (démarche amorcée aussi). *Au fur et à mesure, l'« écart » initial entre drones et aviation commerciale va s'estomper, et les réflexions se fondre dans une réflexion commune globale.*

La question à multiples facettes et évolutive de l'apport potentiel des drones doit être sans cesse approfondie en étroite coordination avec les autres aspects de l'aviation, afin de *consolider les données et les analyses, assurer un suivi critique des évolutions,* dans les différents domaines concernés et aux différents niveaux : local, national, régional, européen et international. *Ceci est impératif pour aiguiser progressivement notre réflexion et nos recommandations.*

PREAMBULE

Les drones sont l'objet de très nombreuses publications (notamment sur internet) : textes réglementaires, rapports et articles divers, d'où ont été extraites certaines des informations utilisées dans ce livret. Une sélection des principales sources est proposée dans l'annexe 1.

Dédiés à de multiples et diverses utilisations, les drones connaissent d'ores et déjà un essor considérable, et nous ne sommes qu'à l'aube de leur expansion, en termes de champs d'application et de capabilités.

Précédées par des applications militaires déjà bien « rodées », consacrées à la surveillance, à la reconnaissance, au guidage vers cibles, aux attaques ciblées, en substitution ou complément des avions militaires classiques, des applications civiles sont en train de se développer de façon exponentielle, avec principalement des drones de petite et moyenne tailles, pesant de 1 à 30 kg[146], tandis que les drones militaires couvrent une gamme allant actuellement de quelques kilogrammes à une dizaine de tonnes.

Cette tendance nette à l'expansion des drones civils s'était déjà bien dégagée, ainsi que les conditions, risques et opportunités associés, lors du colloque international « Présent et futur des drones civils », organisé par l'Académie de l'Air et de l'Espace (AAE) conjointement avec la 3AF, à la DGAC – Paris, les 13 et 14 novembre 2014. A la suite ce colloque fructueux, l'AAE et la 3AF ont publié un dossier (dossier AAE n°40 et cahier 3AF n° 16).

L'essor des drones soulève de nombreuses questions, notamment les suivantes :

- ***quelle place les drones occupent-ils / occuperont-ils dans le transport commercial civil (passagers et fret) du futur ? que sont-ils susceptibles de lui apporter ?***

- ***qu'est-ce qui pourrait / devrait être fait pour rendre leur rôle le plus utile, le plus efficace et le moins pénalisant possible par rapport au transport aérien, et, dans la mesure où ils sont amenés à en constituer une composante, par rapport à la société en général ?***

[146] à titre indicatif

- ***les drones préfigurent-ils l'étape ultime d'une aviation plus automatique et interconnectée, éventuellement via l'étape d'un seul pilote à bord ?***

Nota 1 : L'annexe 6 propose des réflexions complémentaires sur les tendances, finalités et objectifs dans le développement des drones, qui ont sous-tendu en partie notre démarche dans la gestation de ce livret.

Nota 2 : Le contenu de ce livret a fait l'objet d'une brève présentation lors du colloque international « Le transport aérien sera-t-il tout automatique en 2050 », les 1er et 2 juin 2016 à Toulouse. On notera que plusieurs des exposés et des discussions qui s'en sont suivies à ce colloque ont abordé des sujets apparentés à ceux qui sont au cœur de ce livret.

INTRODUCTION

Des drones militaires aux drones civils : bref retour sur l'histoire

Les drones à vocation militaire sont apparus de fait très tôt dans l'histoire de l'aviation : les premières expériences datent d'avant et surtout pendant la première guerre mondiale, les principaux problèmes liés à la stabilisation et au pilotage automatique étant résolus dans les années 1920, selon les normes alors en vigueur. Cette innovation n'a pas percé à cette époque à cause du contexte politique, social, économique et culturel. De nos jours, le terrain est beaucoup plus favorable d'une part grâce à une maîtrise accrue des techniques et aux nombreux développements technologiques : ceux-ci concernent notamment les domaines de la miniaturisation, des systèmes micromécaniques (MEMS), de la propulsion, des nouveaux matériaux, des systèmes embarqués (avionique), de la transmission des données. Le développement des drones a bénéficié en outre des infrastructures mises en place à l'échelle mondiale pour la navigation (incluant le GPS) et les télécommunications. Tout cela a apporté évidemment des capacités et des performances opérationnelles sans commune mesure par rapport au passé (charge utile, rayon d'action, endurance, autonomie, manœuvrabilité). Par ailleurs, une nouvelle manière de faire la guerre est apparue, attribuant une place différente à l'être humain, dont la vie et le temps sont jugés trop précieux pour être engagés dans des missions dangereuses, sales ou monotones. Le drone modifie la représentation du rôle de l'homme dans la guerre en l'éloignant du vecteur aérien et du champ de bataille. Les drones se sont ainsi amplement développés depuis une vingtaine d'années, tandis que les performances toujours améliorées des drones militaires contribuaient à stimuler en parallèle ou parfois conjointement le développement de drones civils.

Place et fonctions des drones dans l'aviation aujourd'hui

Dès leurs débuts, les drones aériens militaires, présentaient les avantages de ne pas exposer de pilote à bord, d'accroître l'autonomie et la discrétion, de réduire les coûts, de permettre de commander à longue distance, de cibler avec une grande précision, avec toutefois une capacité d'emport et une vitesse limitée. Aujourd'hui, les drones militaires se différencient selon leurs caractéristiques : altitude de vol, endurance, portée, configuration, système de propulsion, mode de lancement et mode de récupération. Ils se différencient aussi en termes de mission : leurre, observation, relais de communication sur un théâtre d'opération, dépose de moyens de survie, bombardement, attaque au sol, combat aérien, en appui éventuellement de l'aviation militaire « classique » ... On distingue généralement différentes classes : nano et micro-drones, petits drones, drones tactiques, drones armés et de combat, drones stratégiques : "MALE" (Moyenne Altitude Longue Endurance) et "HALE" (Haute Altitude Longue Endurance).
Des moyens financiers très importants sont dévolus à la recherche et aux développements des divers types de systèmes militaires à base de drones (y compris les infrastructures de service). Cela permet à

ces systèmes de bénéficier de technologies de pointe. Par ailleurs leur mise en œuvre dans des environnements non coopératifs permet d'évaluer et donc de faire progresser rapidement leurs performances opérationnelles et leur capacité de résilience aux pannes et menaces externes.

L'une des performances majeures en cours de développement est la capacité d'autonomie (en lien avec les progrès en matière de propulsion et de batteries) qui permettra de plus en plus de limiter l'intervention des pilotes/opérateurs au sol à des commandes de haut niveau en relation avec les objectifs de mission et non plus avec le pilotage lui-même. Ainsi le démonstrateur nEUROn développé à l'initiative de plusieurs pays européens a déjà pu démontrer de larges capacités en matière d'autonomie de pilotage.

Les drones aériens civils ont commencé à se répandre plus récemment, profitant d'avantages similaires à ceux des drones militaires et, jusqu'à un certain point, des retombées de ces derniers, avec des missions spécifiques variées, notamment pour des applications avec observation/inspection/détection, prises de vue de proximité, recueil d'informations et parfois possibilités d'intervention (multimédia, suivi de flore et faune, agriculture, épandage de produits spéciaux, forêts, lutte contre l'incendie, situations de catastrophes naturelles, repérage/sauvetage/secours en milieu hostile; surveillance de réseaux, carrières, chantiers, bâtiments, ouvrages d'art, lutte contre diverses formes de criminalité). Les drones se développent dans certains cas comme moyens de substitution ou complémentaires, par rapport à d'autres moyens (homme, véhicule terrestre, hélicoptère, avion, satellite…). Quelques applications de transport point à point de petits objets commencent aussi à se développer. Le type de drone le plus fréquemment utilisé est le petit drone à voilures tournantes multiples mais des drones-hélicoptères et à voilure fixe sont aussi utilisés pour certaines missions.
On notera enfin que les drones rendent des services de plus en plus fréquents au transport aérien, comme par exemple pour l'inspection des pistes dans les aéroports, les tâches de maintenance, la lutte contre le danger aviaire, etc.

Drones civils dans le long terme

Ayant retracé le parcours, les motivations et les circonstances bénéfiques ayant conduit à un secteur en plein essor et appelé à se développer encore, par l'effet d'entraînement des applications civiles, conjugué aux retombées technologiques en cours et à venir des développements militaires, cela peut nous aider à ***imaginer les applications et voies d'évolution futures possibles susceptibles d'avoir un impact sur notre sujet de réflexion central : une aviation plus automatique et interconnectée à l'horizon 2050***.
Pour cela, il nous semble opportun en particulier :

- de prendre en compte la « distance » très significative qui sépare aujourd'hui les drones civils des aéronefs de transport,
- d'évaluer l'impact potentiel du "phénomène drones civils" sur le volume et l'organisation du transport aérien de passagers,
- d'évaluer l'apport potentiel spécifique des drones militaires au transport aérien de passagers,
- d'anticiper (dans les grandes lignes) les différentes utilisations qui pourront être faites de l'espace aéronautique pour tous les types possibles d'applications de drones et en déduire les contraintes potentielles de cohabitation par rapport au transport aérien commercial de passagers, ainsi que les interfaces et synergies possibles pour les services généraux (météorologiques, gestion du trafic...),
- d'examiner les retombées technologiques et méthodologiques potentielles des développements et mises en œuvre de drones sur le transport aérien de passagers,
- d'essayer de dégager une vision d'ensemble à long terme en prenant en compte autant que possible les principaux facteurs identifiés, leurs interactions, leurs variabilités, leurs incertitudes, leurs évolutions probables ou possibles, les différents scénarios qui peuvent en résulter, et en essayant d'identifier les orientations et actions souhaitables en vue de favoriser les évolutions bénéfiques.

C'est la démarche que nous adoptons et que nous initions ci-dessous, en examinant à la lumière de différentes applications, les apports directs ou indirects qu'ils peuvent receler par rapport à l'évolution

vers une aviation plus automatique et interconnectée dans le futur, avant de conclure avec une vision globale.
Cette démarche, qui s'inscrit nécessairement dans une dynamique temporelle, devra être complétée et ajustée en fonction des éléments d'information et d'analyse disponibles, les tendances et évolutions observées, en intégrant les aspects technologiques et les retours d'expérience.

APPLICATIONS PRESENTES et FUTURES des DRONES dans la perspective de leurs apports potentiels

« Ecart » entre petits drones civils actuels et aéronefs de transport commercial

Les drones civils de petite taille actuellement utilisés ou en développement, hormis évidemment leur taille, se distinguent des avions civils commerciaux par d'autres éléments factuels que constituent l'objectif des missions et la capacité d'emport correspondante : sur un plan strictement matériel, l'avion a pour principale mission de transporter une « charge marchande » (passagers, bagages et fret) d'un point A à un point B. Les missions des « petits » drones peuvent inclure le transport d'une marchandise de poids et taille limitée, mais ceci n'est qu'un type de mission parmi d'autres très nombreuses et très variées. En effet, l'autre élément de différence majeur sous-jacent est le fait que l'objet volant « petit drone » s'efface très souvent par rapport à son objectif ou sa mission : son rôle se réduit à celui d'un outil, d'un vecteur, d'un porteur de capteurs spécialisés, le vol de l'objet devenant lui-même un instrument, mis, dans nombre d'utilisations courantes, au service de l'acquisition et de la collecte de données précises, adaptées, à compléter par un traitement, une analyse pertinente conduisant à des diagnostics et à des aides à la décision performants, dans le cadre d'une solution globale telle que le client l'attend. Le drone, son vol, les capteurs, sont dans ce contexte des maillons d'une chaîne comprenant des éléments à bord du drone et des traitements postérieurs au sol (cf. colloque sur les drones de novembre 2014 à Paris).

Les caractéristiques, les objectifs, les contraintes, qui prévalent actuellement dans le domaine des petits drones civils sont donc très éloignés d'une utilisation éventuelle de drones de grande taille dans l'aviation commerciale, qui de plus exige des niveaux de sécurité et fiabilité d'un tout autre ordre (pour le transport de passagers en particulier).

Interdépendances entre problématiques des drones actuels et celles du transport aérien

L'écart évident décrit précédemment n'exclut pas certaines interdépendances étroites entre les problématiques concernées : les petits drones ne peuvent pas être ignorés dans le trafic aérien général, du fait qu'ils sont susceptibles d'interférer accidentellement (ou intentionnellement) avec d'autres aéronefs opérant dans l'espace aérien (de nombreux cas de quasi-collisions ont déjà été signalés). Ce point sera abordé dans la suite de ce livret et dans les annexes 2 à 6. ***On notera à ce sujet deux facteurs cruciaux qui conditionnent une insertion réussie des drones dans l'ensemble du trafic aérien : d'une part un partage optimisé de l'espace aérien (ségrégué/non ségrégué), et d'autre part le développement de systèmes efficaces de détection-évitement. Ces facteurs s'appliquent évidemment aux drones de toutes générations et de toutes tailles.***

Impact direct du "phénomène drone" sur le volume et l'organisation du transport aérien de passagers

Les livrets précédents ont déjà largement abordé la question de l'évolution du transport aérien commercial de passagers depuis le mode "avion" (avec deux pilotes à bord aujourd'hui) vers le mode drone (sans pilote à bord). Il a été conclu que la réduction du nombre de pilotes à bord pouvait être associée à une éventuelle réduction de coûts d'opérations (encore à évaluer), mais ne changerait probablement pas de façon significative les grands équilibres économiques et donc le volume et l'organisation du marché. De plus, il a été conclu que pour des raisons de sécurité, il était hautement probable qu'il y ait toujours au moins un pilote à bord des avions de transport commercial de passagers à l'horizon 2050. *Compte tenu de ces considérations et aussi de la grande « distance » séparant les drones civils actuels des avions commerciaux, évoquée dans la section ci-dessus,* ***des drones de transport de passagers paraissent improbables à l'horizon 2050.*** *L'impact direct du « phénomène drone » pourrait donc se résumer - à l'exception de quelques utilisations spécifiques en marge du transport aérien, qui pourraient cependant se développer - aux risques d'interférence entre le trafic des drones et le reste du trafic aérien. Néanmoins, cet aspect n'est / ne sera pas sans effet sur l'ensemble de la réglementation et les questions correspondantes de sécurité, lesquelles ne sont pas limitées au transport de passagers (cf. annexe 4 - Problématique de Fiabilité-Sécurité des drones).*

Apport potentiel spécifique des drones militaires au transport aérien de passagers

Les drones militaires, du fait de leur taille, de leurs systèmes plus sophistiqués, des exigences spécifiques, liés à des missions et conditions d'utilisation difficiles, en milieu hostile : performance (rayon d'action et autonomie en particulier), résilience aux attaques matérielles ou cybernétiques, sont relativement plus « proches » des avions commerciaux que ne le sont les drones civils actuels. Toutefois, en se basant sur les incidents/accidents rapportés concernant des drones militaires opérationnels, leurs niveaux de fiabilité sont probablement inférieurs de plusieurs ordres de grandeur à ceux des avions commerciaux.

A titre d'exemple, l'avion sans pilote nEUROn[147], est porteur d'informations très intéressantes dans le contexte des applications civiles des drones. Ainsi, parmi les objectifs de ce programme de démonstration en vol qui vient d'être relancé, on retiendra notamment :

- l'insertion de ce type d'aéronef dans la zone d'essais,
- la capacité de s'intégrer dans un réseau info-centré,
- les algorithmes de haut niveau nécessaires au développement des automatismes,
- la place de l'élément humain dans la boucle de la mission,
- l'exécution d'une mission air-sol, de façon autonome,
- la validation de technologies de commande et de contrôle d'un véhicule sans pilote, d'une taille équivalente à celle d'un avion de combat, disposant de tous les modes secours nécessaires pour garantir le niveau de sécurité requis.

Les travaux de Dassault Aviation en rapport avec ce projet sont riches sur le plan conceptuel, par exemple dans les domaines concernant la définition des modes de fonctionnement (mode normal en partant d'une situation saine en mode secours, afin d'éviter un effet de falaise en cas de panne), celle

[147] Le nEUROn, initiative française gérée sous l'autorité de la DGA, qui a été rejointe par plusieurs gouvernements et industriels européens, est un projet de démonstrateur technologique d'un véhicule de combat aérien non piloté (**UCAV – « Unmanned Combat Air Vehicle »**), élaboré dans le cadre d'une coopération industrielle européenne, lancé en 2003 dans le but de démontrer la maturité et l'efficacité des solutions techniques. Dassault Aviation en est le maître d'œuvre. Une nouvelle phase expérimentale démarre en 2016.

des modes de récupération, et les trajectoires préprogrammées permettant de s'affranchir des limitations liées aux temps de réponse.

L'exemple du nEUROn a fait l'objet d'un exposé très didactique de Dassault Aviation couvrant ces sujets lors du colloque international « Le transport aérien sera-t-il tout automatique en 2050 ?» les 1er et 2 juin 2016 à Toulouse. On notera que lors de ce même colloque, deux autres exposés ont apporté des compléments d'information intéressants en matière d'automatismes tirés de l'expérience de l'Avion Rafale, l'un de Dassault Aviation, l'autre de l'Armée de l'Air.

L'apport potentiel des concepts et des technologies développés dans le contexte militaire sur de « grands démonstrateurs » (qui pourraient être, et seront vraisemblablement suivis d'autres encore plus évolués dans le futur), peut être d'autant plus significatif qu'il est favorisé par l'effet de la proximité relative des problématiques (comparé à la distance entre petits drones et avions de transport aujourd'hui), ceci se combinant avec l'importance des investissements consacrés à la R&D dans le domaine militaire, comme déjà mentionné.

On notera cependant que l'apport indirect significatif des drones militaires au profit de l'aviation commerciale ne se fait pas purement à sens unique : comme dans d'autres situations concernant les échanges entre l'aviation commerciale et l'aviation militaire, on peut anticiper des développements des drones militaires qui bénéficient d'effets d'ouvertures et dynamisation des marchés liés aux développements dans le monde des drones civils, avec des synergies réciproques positives.

Utilisations potentielles de "l'espace aéronautique" pour les services à base de drones à l'horizon 2050 et contraintes de "cohabitation" pour le transport de passagers

D'une façon générale, l'accès à l'espace aéronautique ouvre la voie à des applications de transport aussi bien à grand qu'à petit rayon d'action. Il permet des mesures "in-situ" dans l'atmosphère pour des besoins de météorologie, de surveillance environnementale (qualité de l'air, suivi des gaz à effets de serres, mesures locales de paramètres physiques…) et à des expérimentations. Enfin Il ouvre la voie, en parallèle ou en complément de l'espace orbital, à des applications dans le domaine des communications (relais de transmissions), et dans celui de l'observation à des fins opérationnelles (observation de la Terre) ou scientifiques (observation de la Terre et de l'Espace).

Les applications dans le domaine du Transport (hors transport de passagers)

Les applications dans le domaine du *transport à longue distance (passagers privés ou fret)* justifient le plus souvent l'utilisation de cellules de grandes dimensions et de sites aménagés au départ et à l'arrivée. Comme pour le transport commercial de passagers, on pourrait penser que pour le transport de fret, la suppression de la charge représentée par les pilotes à bord telle qu'elle résulte du mode drones, en soi, ne bouleverserait pas les équilibres économiques, mais il y a d'autres facteurs en jeu, explicités ci-après.

Le transport de marchandises représente aujourd'hui en nombre de tonnes.km, environ 22% du trafic dévolu au transport de passagers. Les taux de croissance du trafic de fret sont actuellement très inférieurs - avec même une tendance au déclin - comparés à ceux du trafic passagers. Ceci est notamment lié à la relative faiblesse du trafic des avions exclusivement consacrés au fret, si on exclut le trafic américain et transcontinental, la rentabilité économique et l'utilisation de plateformes communes favorisant le transport mixte de passagers et de fret assuré par les compagnies aériennes. En outre, le trafic de marchandises pourrait être soumis dans le futur à des conditions plus restrictives sur le plan de la

réglementation liée à l'environnement. Malgré cela, il est légitime de penser que ce trafic continuera de représenter une part significative du transport aérien dans le futur.

Si toutes les conditions ne sont pas réunies permettant d'assurer le transport des passagers avec des drones à l'horizon 2050, pour le transport de marchandises et dans le cas du fret non périssable, l'absence de pilotes, en libérant les contraintes de pression, de température et de durée du vol, pourrait favoriser l'émergence de cellules assez différentes des avions classiques d'aujourd'hui. Par ailleurs, les drones peuvent offrir une plus grande souplesse au niveau des exigences ou des moyens d'y répondre (par exemple, concernant le transport de certains produits « dangereux »). Déjà dans le domaine des petits drones aujourd'hui, on note une forte activité dans l'expérimentation de transport de petites charges, témoignant de l'attrait de ce mode de transport. On peut imaginer dans le futur des modèles de transport de fret combinant diverses catégories de drones (de différentes tailles) utilisés entre diverses plateformes : aéroportuaires, urbaines, commerciales ou individuelles. De tels modèles bénéficiant de la souplesse d'utilisation des drones pourraient s'avérer rentables.

Le ***bilan*** devra être fait des effets de simplifications / avantages économiques liés aux réductions d'exigence et aux nouvelles opportunités de marchés que les drones pourraient offrir, ***tout en tenant compte évidemment des exigences au niveau des risques d'accidents (collision, écrasement)***. La souplesse qu'apportent aujourd'hui d'une part l'utilisation d'avions transportant à la fois des passagers et du fret, d'autre part les possibilités de conversions d'avions, enfin les implications d'une optimisation éventuelle de la flotte d'avions de fret, devront être prises en compte dans les études comparatives. ***On ne peut exclure in fine un changement de paradigme avec des drones de dimensions, charge marchande et rayon d'action adaptés, éventuellement utilisés dans des missions combinées, capables d'assurer le transport de fret dans des conditions viables du point de vue de la sécurité et rentables sur le plan économique, constituant alors une première étape dans le développement de drones commerciaux.***

Les applications dans le domaine du *transport de charge matérielle à courte distance* peuvent justifier l'utilisation de cellules de petites ou moyennes dimensions dans lesquelles la présence de pilote à bord serait (très) pénalisante en termes directs de masse relative embarquée, volume et coût, ainsi qu'en termes indirects liés aux exigences de conditionnement, de protection et de sécurité du vol compte tenu de la présence humaine à bord... De tels transports plus localisés, mais pouvant être combinés à d'autres, comme évoqué précédemment, pourraient utiliser des flottilles de drones de dimension réduite ou intermédiaire, dont chacun représenterait un risque par ailleurs nettement diminué en termes de conséquences, et dont l'impact sur les infrastructures serait minimisé. Leur multiplication pourrait toutefois conduire à augmenter le risque de collisions et compliquer leur surveillance.

On pense ici aux applications de ravitaillement, livraison personnalisée et urgente de petites charges, dépose de matériel de secours ou de médicaments, épandage agricole, épandage sanitaire, lutte contre les incendies de forêt. On conçoit aisément que l'utilisation maîtrisée de drones avec un cadre réglementaire à définir précisément pour chaque type et secteur d'application puisse permettre de développer de nouveaux segments de marché ou de nouveaux services, comme cela semble déjà envisagé et popularisé par des effets d'annonces[148]. Afin de limiter les risques liés aux opérations de tels drones au voisinage d'aéroports existants, on pourrait concevoir l'utilisation d'aéroports et de couloirs dédiés, qui supposerait le développement de nouvelles infrastructures (qui peuvent être relativement simples et de dimensions réduites pour les appareils à voilure(s) tournante(s)) et une surveillance du trafic aérien appropriée. Le risque de collision, bien que limité ainsi, subsistera cependant, en cas de déviation accidentelle par rapport aux trajectoires prévues, ou en cas d'acte de malveillance.

[148] On notera que la règlementation provisoire applicable aux petits drones de moins de 25kg émise par la FAA le 21/06/2016, en n'autorisant que le vol à vue, exclut pour le moment les opérations projetées par Amazon ou Google aux USA. Mais cette réglementation est susceptible d'évoluer…

Les applications dans le domaine du transport privé de passager

Ces applications *à courte distance (transport individuel ou familial pour le loisir ou l'accès au lieu de travail)* pourraient aussi, pour des raisons évidentes, largement bénéficier de l'émergence des drones (notamment drones hélicoptères) avec pilotage entièrement autonome.

Contraintes de cohabitation avec le transport de passagers

En lien avec les applications existantes et celles projetées, décrites dans les paragraphes a) et b) ci-dessus, l'espace aéronautique à basse ou très basse altitude (moins de 600m à titre indicatif), pourrait supporter des développements de trafic plus ou moins importants à l'horizon 2050. Dans ce contexte, les interférences potentielles avec le transport de passagers peuvent être nombreuses aux abords des aéroports, et des réglementations et protections actives doivent être mises en place. Plus globalement, l'ensemble des exigences de sécurité et fiabilité doivent être satisfaites, avec entre autres, des problématiques similaires à celles mentionnées dans les livrets traitant de la réduction de l'équipage à bord des avions futurs, impliquant par exemple des temps de réponse suffisamment courts dans les communications, selon les phases de vol. En outre, le risque d'écrasement avec dommages aux personnes et aux biens au sol doit être pris en compte, avec une criticité dépendant du nombre, de la taille et de la masse / énergie des drones concernés. Des solutions du type trajectoires préprogrammées inspirées des applications militaires pourraient alléger certaines contraintes, sous réserve qu'elles puissent être mises en œuvre de manière opérationnelle, sûre et efficace.

Conditions-clés pour les applications de transport

D'une manière générale, on peut anticiper que ***pour toute application future de drones dédiée au transport*** *(transport privé de passagers ou dans l'éventualité de transport commercial de fret)****, les niveaux de fiabilité et sécurité opérationnels devront être égaux ou supérieurs à ceux des aéronefs pilotés à bord qu'ils remplacent***.

L'utilisation future éventuelle de drones de dimensions importantes pour des missions militaires de transport pourrait apporter un potentiel d'expérience, dans le contexte d'une transposition au domaine civil.

La rentabilité économique globale des diverses solutions, par rapport à la situation actuelle, pourrait être améliorée, mais là encore, devra être confirmée.

Il est difficile à ce stade d'approfondir les analyses de sécurité, de rentabilité économique (capacités d'investissements incluses), et les études de scénarios possibles, compte tenu des informations fragmentaires entourées d'incertitudes fortes et multiples à l'horizon 2050, dans un contexte éminemment évolutif.

Les applications dans le domaine des Télécommunications

Les réflexions menées depuis de nombreuses années sur les infrastructures de télécommunications reconnaissent les potentialités complémentaires offertes par : (1) les satellites (en orbites géostationnaire, intermédiaires et basses), (2) les avions, drones et ballons à haute altitude (stratosphère), (3) les relais hertziens terrestres (tours...) et (4) les câbles. L'utilisation de ballons captifs à basse altitude, voire de relais temporaires sur avions à basse altitude est plus anecdotique.

L'utilisation de relais atmosphériques à haute altitude a déjà été envisagée pour des phases transitoires de démarrage de nouveaux services ou en réponse à des besoins exceptionnels sur des durées de quelques semaines (événements sportifs par exemple). Elle est envisagée de façon pérenne pour le futur, notamment pour absorber les trafics haut débit et l'interconnexion à échelles régionales.

Ces relais peuvent être supportés par des ballons, ou des avions, ou des drones solaires capables de vols quasi stationnaires à haute altitude (~20 km) et de longue endurance (plusieurs semaines). L'intérêt d' « éliminer » les pilotes est évident d'un point de vue économique et opérationnel mais n'oblitère pas l'aspect réglementaire délicat.

Malgré des efforts depuis plusieurs décennies, ces types de ballons et de drones solaires avec des capacités d'emport de charges utiles de plusieurs centaines de Kg et exigeant plusieurs KW ne sont toujours qu'à un stade de recherche et développement.

Les projets ou programmes en cours d'initialisation ou d'étude pour le développement et la mise en service de communications à haut débit au moyen de constellations de satellites en orbite basse ou de ballons stratosphériques témoignent de l'intérêt commercial majeur de ce type d'application et du niveau d'investissement privé, potentiellement très élevé.

Les retombées technologiques et opérationnelles (trafic) induites sur les systèmes de transport de passagers seraient vraisemblablement limitées. Dans le cas de ballons ou de drones à très longue durée de vol, des espaces spécifiques devraient probablement être réservés pour la montée et la descente lentes depuis ou vers le site d'accueil au sol.

Dans tous les cas, les risques inhérents aux survols prolongés de régions à forte densité de population devraient conduire à des exigences spécifiques très sévères en termes de sécurité pour les personnes et les biens au sol.

Les applications dans le domaine de l'Observation

Comme dans le domaine des télécommunications, les diverses potentialités offertes par l'espace orbital et l'espace atmosphérique sont spécifiques et potentiellement complémentaires.

Les diverses applications font apparaître des besoins de différents types tels que ceux rappelés ci-dessous:

- relevés des contenus et mouvements atmosphériques à différentes échelles pour la météorologie et le suivi de l'environnement (gaz à effets de serre, poussières volcaniques...)

- relevés et surveillance à grande échelle ou à échelle moyenne de phénomènes à évolution potentiellement rapide (à l'échelle de quelques heures ou de quelques jours) résultant d'activités humaines ou de phénomènes naturels au niveau (ou proche) du sol (surveillance maritime, surveillance de frontières, surveillance de sites, surveillance de trafic, niveau des rivières, état de la végétation, suivi des plantations ...)

- relevés à grande échelle ou à échelle moyenne de type cartographique de scènes statiques ou à évolution lente au niveau (ou proche) du sol (cartographie 2D et 3D, inventaires des plantations, ...)

- relevés de proximité pour l'agriculture, les infrastructures, les chantiers, le multimédia, le contrôle à échelle locale voire individuelle du respect des lois et règlements,

- relevés de données d'observation de l'espace à des fins scientifiques (relevés faits le plus possible au-dessus de l'atmosphère à l'aide de porteurs : ballons ou drones stratosphériques).

Les capteurs peuvent être portés par des supports à toutes les latitudes, avec, plus marqué que pour les relais de communications, un intérêt aussi sur les mesures à des altitudes moyennes correspondant au vol des avions de transport commerciaux de passagers (altitudes qui intéressent moins les relais de télécommunications). On peut en effet noter que les mesures des radars météos embarqués sur ces avions sont potentiellement utiles aux services de météorologie.

Cependant, pour des raisons économiques, une segmentation plus ou moins marquée pourrait progressivement apparaître entre d'une part les capteurs placés sur des porteurs à haute altitude (> 15 Km) pour des applications relatives au suivi de phénomènes à évolution rapide, à échelle régionale, et les capteurs placés sur des petits drones pour les relevés de proximité spécifiques à chacun des besoins.

On retrouve alors plus ou moins les problématiques d'interférence avec le transport aérien commercial de passagers déjà citées plus haut.

Les applications impliquant des mesures ou des expérimentations "in-situ" dans l'atmosphère

Les drones faciliteront incontestablement les mesures in-situ dans l'atmosphère et remplaceront efficacement les ballons météorologiques pour effectuer certains relevés. De même pour certaines expérimentations (démonstrateurs technologiques par exemple) nécessitant la présence physique d'un équipement ou l'évolution d'un système à une altitude ou à un endroit spécifique de l'atmosphère pendant une durée significative.

Il s'agit cependant, dans tous les cas, d'une utilisation marginale en termes de trafic.

On notera que les diverses applications potentielles envisagées ci-dessus se fondent par définition sur la situation présente et l'état des connaissances aujourd'hui. On ne prétend pas en donner un panorama exhaustif englobant tout ce qui pourrait faire évoluer la vision entre aujourd'hui et 2050, avec notamment d'autres applications possibles, susceptibles, pour certaines au moins, de bénéficier directement ou indirectement au transport aérien.

D'une façon générale, il est probable que les drones seront utilisés en tant que moyen alternatif, complémentaire, remplacement ou nouvelle utilisation possible chaque fois qu'ils apportent un avantage au donneur d'ordre ou à l'opérateur considéré, situation qui peut évidemment changer selon les besoins spécifiques, les capacités, le tout évoluant dans le temps.

Retombées technologiques et méthodologiques potentielles des développements et mises en œuvre de drones pouvant servir au transport aérien

Le développement et le déploiement harmonieux des drones n'est pas « acquis d'avance » : il implique que l'on sache relever efficacement un certain nombre de défis, notamment d'ordre réglementaire, et que l'on contre les freins potentiels que sont par exemple des investissements mal calibrés ou un marché trop fragmenté (cf. annexe 2).

Néanmoins, les drones bénéficient de nombreux avantages. Les drones de petite taille ont en particulier l'avantage d'une relative simplicité sur le plan de la conception des systèmes, de la construction, de la souplesse et de la facilité d'utilisation, des coûts limités d'investissements, d'infrastructures, d'acquisition et d'opération, qui peuvent se répercuter favorablement sur des drones de plus grande taille, du fait de l'expérience acquise, en partie transposable. Les nombreuses applications réelles et potentielles, civiles, publiques et commerciales, sont autant d'éléments moteurs dans le développement des drones.
Les progrès techniques et technologiques sont très rapides, du fait de la forte demande, de la diversité des applications, des utilisateurs, de leurs exigences de leurs besoins et de leurs types d'opération, combinés à la souplesse, à la taille et aux faibles coûts de développement / mise au point / optimisation des drones actuels, avec de plus en plus d'équipements disponibles « sur étagère » à un prix modéré.

Cette dynamique stimulant les progrès technologiques des drones retentit / retentira au niveau du transport aérien.

On a entrevu précédemment le rôle « précurseur » particulier que les drones militaires peuvent jouer par rapport aux développements conceptuels et technologiques partiellement transposables à des avions de transport futurs.

De multiples développements et activités rendus possibles ou facilités par les drones (civils et militaires), associés à des effets diffus, difficilement discernables de l'ensemble des progrès scientifiques, techniques, industriels, opérationnels et en termes de marchés auront probablement des retombées favorables (la plupart indirectes) sur le transport aérien, telles que :

- Aide plus ou moins directe pour la surveillance des aéroports (pistes, infrastructures, danger aviaire, etc.), l'inspection des avions, le recueil d'informations sur le trafic aérien et la météo, le rôle de relais de communications.

- Apport technique/technologique par les retombées spécifiques en termes de miniaturisation, de développement de systèmes de détection/évitement, de systèmes équipés de capteurs hybrides, de radars, lidars et lasers miniatures, etc.

- Contribution, sur le plan conceptuel, méthodologique, technique et opérationnel, au développement de technologies d'automatisation et de modes / protocoles opératoires, à l'optimisation des interfaces homme-machine-environnement.

Ceci peut inclure des informations très utiles sur la faisabilité, la fiabilité (notamment à partir de données expérimentales, ou dérivées des applications militaires), l'utilisation de systèmes auto-adaptatifs et d'intelligence artificielle, la prédictibilité de certains événements, les procédures de reprise en main, avec ou sans modes de secours / modes dégradés, retour sur base ou déroutement, en cas de situation d'urgence accidentelle ou d'intention/intervention malveillante, …

- Problématiques en partie semblables entre drones et aéronefs futurs à « équipage réduit » à bord, les premiers offrant une échelle plus accessible en termes de conditions de réalisation et de coûts de développement et expérimentation associés (problèmes d'automatisation, d'autonomie, évaluation des besoins et essais d'interconnexions de systèmes et signaux,…). En outre, certains avions sont ou vont être conçus en vue d'une double utilisation possible : avec ou sans pilote, pour des raisons de facteur d'échelle de marché, coûts, rentabilité économique (constructeur et utilisateur), etc.

- Risques et parades similaires (écrasement, collision, risques cybernétiques, détection/évitement).

- Acteurs du secteur aérospatial et télécommunications en grande partie communs, interfaces multiples au niveau des organismes de recherche, des agences gouvernementales, des organismes impliqués dans la réglementation, des institutions internationales concernées, des industriels, constructeurs et équipementiers, participant à un tissu industriel aérospatial global.

- Champs d'études, recherches et expérimentations en partie communs.

- Développements et commercialisation de produits en partie communs ou similaires (capteurs, capteurs hybrides, équipements, systèmes).

- Applications duales militaires-civiles, favorisées aussi par les acteurs communs.

- Marché diversifié, besoins nouveaux et ouverture de possibilités d'applications nouvelles pour des missions de plus en plus exigeantes et ambitieuses, impliquant le développement, l'expérimentation et la mise au point de technologies et produits aux caractéristiques variées, tout ceci conduisant inévitablement à une montée en dimensions et en masse de certains drones, équipés de systèmes de plus en plus sophistiqués, de plus en plus performants, se rapprochant ainsi du domaine de l'aviation « traditionnelle ».

- Marché appelé à mûrir, avec augmentation des rendements financiers et des capacités accrues d'investissement, avec l'apparition probable de nouvelles niches productives, en lien avec certaines applications mentionnées précédemment et avec les applications militaires.

- Potentiel important dans de multiples branches et activités de la société, rôle stimulant-dynamisant-décloisonnant, notamment pour les PME et pour l'emploi, par l'extension-diversification-synergie des métiers, profitables au transport aérien en général.

On notera que si un grand écart existe entre les petits drones actuels et le transport aérien commercial présent et futur, les caractéristiques de souplesse, versatilité, facilité de mise en œuvre, coûts réduits, développements rapides de ces drones sont des moteurs qui, d'une part leur confèreront un rôle important de stimulateur de solutions techniques innovantes, et d'autre part, en stimulant leurs propres mutations, tendront à réduire progressivement l'écart initial entre les drones et les autres aéronefs, à l'image d'un effet autorégulateur.

Facteurs d'évolution vers des drones civils de grandes dimensions

A la lumière de nos réflexions et de celles apportées par le contenu des divers autres livrets, nous pouvons tenter de faire une synthèse des facteurs conditionnant l'évolution vers des drones civils de grandes dimensions, en cherchant à évaluer leurs effets tendanciels (freins/problèmes ou stimulants/solutions). Cette synthèse est représentée dans le tableau 1 ci-après (cf. pages suivantes).
Ce tableau a été structuré de façon à faciliter la vision globale du sujet, sans être exhaustif, car se concentrant sur les facteurs majeurs ayant émergé de nos réflexions, et avec l'inconvénient inévitable de ne pas pouvoir représenter les innombrables liens, interactions, combinaisons et imbrications entre les divers facteurs dans la réalité.[149]
Par ailleurs, l'évaluation des effets et des risques comprend une part d'interprétation subjective et reste affectée par des incertitudes notoires, inhérentes notamment aux évolutions possibles d'ici 2050, d'ordre technologique, opérationnel, réglementaire, environnemental, économique, géopolitique ou contextuel.

Sur la base de notre synthèse, et avec les réserves indiquées, il ressort, de façon convergente par rapport aux conclusions des livrets précédents, qu'à l'horizon 2050, la probabilité de voir des drones de grandes dimensions contribuer de manière significative à l'aviation civile de transport semble très faible. Cependant, on ne peut écarter l'hypothèse que des drones de fret puissent apparaître à l'horizon 2050, sous réserve que dans l'intervalle, les barrières dans les domaines précités soient levées, sur lesquelles se greffent les exigences primordiales de fiabilité, sécurité et sûreté, et auxquelles s'ajoutent les aspects psychologiques.

Ceci ne diminue pas pour autant le rôle irremplaçable que les drones pourront jouer en tant qu'inspirateurs, facilitateurs et accélérateurs dans le pré-développement de solutions technologiques innovantes, tel qu'explicité précédemment.

[149] On pourrait considérer que ceci est en quelque sorte à l'image de l'activité et du potentiel du cerveau humain, qui condense, gère et combine à chaque instant les informations sensorielles, les performances physiologiques (interprétation, temps de réaction), le langage, les communications avec autrui, les facultés mentales et intellectuelles (raisonnement, attention, intuition) et psychologiques (inconscient, subconscient, contrôle des émotions), l'expérience (connaissances, mémoire, vécu) et la gestuelle (commande, adresse).

Tableau 1 : Bilan global estimé des facteurs d'évolution (Partie 1/4)

Légende : **0** *neutre*

+	favorable *modéré*	-	défavorable *modéré*
++	favorable *significatif*	- -	défavorable *significatif*
+++	favorable *important*	- - -	défavorable *important*

Catégorie	Facteur	Effets tendanciels des facteurs			Commentaires
		Freins/Problèmes	Stimulants/Solutions	Global	
Fiabilité - Sécurité - Réglementation	Conception - Méthodologies - Opérations - Formation - Autorités (Tous acteurs concernés)	- Conditions plus complexes et niveaux d'exigence élevés -. Réglementation à compléter et étendre à de nouveaux domaines - Besoins de standardisation et de coordination-coopération entre tous secteurs - Le cas de crash commandé en ultime recours peut être critique - La perte de signal C2 peut avoir de sérieuses conséquences - Nombre croissant de petits drones problématique. - Investissements importants nécessaires pour lever les freins	La prise de conscience existe, des efforts significatifs sont entrepris afin de résoudre les problèmes posés, y compris les aspects cybernétiques, mais seront-ils à la hauteur des enjeux, et les solutions seront-elles viables, à l'horizon 2050?	--	Catégorie-clé reliée à toutes les autres. - Doivent y être ajoutés les aspects sûreté
Opérationnelle: Insertion dans l'espace aérien (incluant des solutions technologiques)	Espace aérien ségrégué avec ou sans zones d'exclusion	- Risque de pénétration de zones interdites en cas de pannes - Solutions de ségrégation et d'exclusion restrictives pour les opérations, économiquement pénalisantes + impact sur le marché	Cartes et logiciels robustes de geo-fencing intégrés dans les systèmes minima exigés par la réglementation : peuvent réduire les risques	--	
	Cohabitation dans l'espace aérien non ségrégué	- Risque de collision en vol - Contraintes dans les concepts et développements de systèmes et logiciels exigeant un certain niveau de compatibilité entre divers aéronefs, aéroports et ATC, avec répercussions sur les coûts	- Systèmes S&A robustes intégrés dans le minimum exigé par la réglementation : peuvent réduire les risques - Systèmes d'échanges de données et signaux de communication entre aéronefs divers standardisés et optimisés	---	
	Opérations au sol	- Risque d'un obstacle sur la piste exigeant une réaction urgente - Partage des pistes dans les opérations aéroportuaires entre avions pilotés à bord et avions sans pilote / Capacité des pistes	- Système de remise de gaz automatique (risques résiduels?)	-	

Tableau 1 : Bilan global estimé des facteurs d'évolution (Partie 2/4)

	Gestion du pilotage depuis le sol	- Besoins d'adaptation organisation, logistique, technologies, équipements, formation - Transition entre différents centres, pilotes, intervenants/équipes pour un même vol ou pour une série de vols - Partage des responsabilités techniques et légales à mettre en œuvre	. Diverses options possibles d'optimisation avec phase d'expérimentation / apprentissage / mise au point pour les acteurs (individus et organisations) et les systèmes impliqués . Maximiser la standardisation des méthodes, des systèmes et des formations	-	Développements importants en cours de systèmes de détection-évitement, qui devraient profiter au transport aérien futur en général. . L'écart initial entre drones et autres aéronefs pourrait se réduire dans le futur, avec les évolutions et les progrès, les différentes problématiques pouvant alors se confondre
Interface Homme-Machine	Affichages	- Questions relatives aux liaisons entre machine, pilote, ATC et aéroport - Standardisation ardue à cause de la disparité des systèmes avions	Standardisation et optimisation peuvent progresser pour stations sol, machines et formation	++	La standardisation, nécessaire, peut bénéficier à l'aviation future, en cas d'assistance depuis le sol
	Automatisation accrue	- Des automatismes plus sophistiqués réduisent les risques, mais peuvent rendre les imprévus plus critiques. - Risque de confiance excessive - L'automatisme permet-il de se passer des interventions positives des pilotes?	- Optimisation possible et prévisible (incluant les logiques en mode de fonctionnement dégradé - Risques d'erreur humaine et de panne réduits	++	
	Liaison Pilote-Machine	- Temps de latence pouvant être défavorable en cas de situation urgente non couverte par automatisme - Risque de perte de liaison avec conséquences sur la mission (éventuellement, retour à la base, voire crash commandé)	- Le débit de transmission des données peut être maximisé, mais peut encore être insuffisant - La perte de liaison peut être partiellement contrôlable en modes de secours dégradés	--	Le débit minimum nécessaire de transmission des données varie en fonction des phases de vol et des circonstances

Tableau 1 : Bilan global estimé des facteurs d'évolution (Partie 3/4)

Facteurs Humains	Psychologie des télépilotes au sol	- Réticence initiale à un degré élevé de sophistication d'automatisme, en particulier aux logiques non-déterministes, aux approches probabilistes ou relevant de l'intelligence artificielle	Avec la montée progressive de la confiance, l'acceptabilité de niveaux plus élevés d'automatisation peut augmenter, mais jusqu'à quel point ? (des affichages bien conçus peuvent aider)	**0**	
	Possibilité d'intervention positive du pilote au sol	Taux d'interventions positives d'un télépilote probablement inférieur à celui d'un pilote à bord (moyens sensoriels pour appréhender une situation anormale, capacité et rapidité de réaction (temps de transmission des signaux)	La capabilité d'intervention positive du télépilote existe et pourrait être améliorée jusqu'à un certain point	-	
Stratégique	Retombées des "petits drones" et des drones militaires : technologiques, opérationnelles, économiques,..)	Ecart important actuel entre petits drones civils et aviation civile : fiabilité insuffisante, risques de collision accidentelle, d'acte malveillant, d'atteinte à la vie privée, réglementation laborieuse et complexe (types et opérations très divers, problématiques hors contexte aéronautique) peuvent nuire au développement harmonieux des petits drones	- Pré-développements et solutions techniques facilités, stimulés (coûts, délais, risques réduits) - Grand nombre de drones et applications, coûts réduits, synergies (R&D dévts technologiques, débouchés commerciaux, extension - diversification du marché aéronautique - Aide significative attendue d'un partage optimisé de l'espace aérien, de technos / automatismes de réduction des risques, d'une réglementation claire, exhaustive et équilibrée	++	- Développements en cours importants de systèmes de détection-évitement efficaces, qui devraient profiter au transport aérien futur en général. - L'écart initial entre drones et autres aéronefs pourrait se réduire dans le futur, avec les évolutions et les progrès, les différentes problématiques pouvant alors se fondre en une seule

Tableau 1 : Bilan global estimé des facteurs d'évolution (Partie 4/4)

Économique	Drones de transport de passagers	- Exigences de sécurité/fiabilité/sûreté et réglementaires associées - Dépendance critique de canaux de transmission de données - Freins divers évoqués ci-dessus - Freins psychologiques	- Effets stimulants et solutions partielles évoqués ci-dessus	---	- *Improbable en 2050* *On n'entrevoit pas de modèle économique viable dans la mesure où la satisfaction d'exigences fondamentales n'est pas garantie*
	Drones de fret	.- Drones de transport passagers improbables en 2050 - Exigences de fiabilité/sécurité compatibles avec des drones de fret ? - Répondent-ils à la demande du marché : rentabilité pour les compagnies, qui utilisent préférentiellement la souplesse que procurent des avions à usage mixte? - Freins environnementaux ? - Prendre en compte l'ensemble des coûts et impacts associés aux différentes solutions	- Potentiel important du fret (actuellement ~ 22% des MTK) - Bénéfices potentiels de drones dédiés optimisés (contraintes et exigences réduites) - Nouvelles opportunités de marchés / possibilité de nouveaux modèles économiques rentables : missions pouvant combiner divers drones entre diverses plateformes, utilisant leur souplesse d'utilisation	+	*Drones de fret vers 2050: non exclus*, si les obstacles majeurs de divers ordres sont surmontés (technologique, sécurité, réglementaire, économique: rentabilité et marché, barrières psychologiques,…)

RECOMMANDATIONS

Nos considérations nous conduisent à émettre un certain nombre de recommandations, qui reflètent un état de la réflexion et une situation des drones dans une phase précoce de leur essor, appelés à évoluer de façon importante et difficilement prévisible à long terme. Ceci explique que ces recommandations restent en majorité assez générales. Elles doivent être considérées avec circonspection, un certain nombre d'entre elles étant appelées à être affinées ou revues au fil du temps, en fonction de l'évolution du contexte, du progrès des connaissances, des avancées technologiques et de l'expérience.

- Les objectifs de sécurité et de fiabilité des drones de grandes dimensions doivent être calibrés pour être cohérents avec ceux des aéronefs pilotés à bord effectuant des missions comparables (et par conséquent plus ambitieux à l'horizon 2050 en taux d'accident par vol que les niveaux moyens effectivement atteints actuellement).

Recommandation 1 **: Les objectifs de sécurité et de fiabilité des drones de grandes dimensions doivent être cohérents avec ceux des aéronefs pilotés à bord.**

- Le développement des concepts systèmes et logiciels protégeant efficacement les drones, leurs systèmes et équipements contre les cyber-attaques (incluant des cryptages de signaux) doit être renforcé et accéléré, coordonné avec les efforts similaires voués aux autres aéronefs, tout en tenant compte de leurs besoins propres.

Les fonctions, les technologies et les méthodes spécifiées de conception, démonstration, validation et vérification (y compris les critères de qualité), les procédures opérationnelles et la formation des personnels, destinées à garantir des seuils de sécurité des drones et de fiabilité de leurs équipements (au même titre que pour les autres aéronefs, mais en les adaptant aux drones) doivent faire l'objet d'un degré optimal de standardisation à tous les niveaux (local régional, national et international, et une harmonisation des règlements, ce qui implique une coopération étroite entre les organisations concernées (aviations civiles, EASA, FAA, OACI,…).

Ceci doit être étendu aux dispositions réglementaires dans des domaines connexes au secteur aéronautique concernés par les opérations de drones, en impliquant les experts des domaines concernés.

C'est le cas notamment pour les questions de sécurité/sûreté cybernétique, avec des spécialistes de la lutte contre le piratage informatique, celui de systèmes GPS par exemple, compte tenu de la vulnérabilité inhérente aux signaux de contrôle/commande nécessaires à l'opération des drones.

Recommandation 2 **: Les drones doivent être conçus et opérables de façon à assurer un niveau de sécurité (cyber-sécurité incluse) satisfaisant et cohérent avec celui des autres aéronefs.**

- Compte tenu de la réglementation complexe, multifactorielle, en gestation visant à intégrer les drones de diverses sortes et évolutifs (caractéristiques, types d'opérations, équipements), cohabitant avec d'autres drones et d'autres aéronefs de diverses générations, les besoins d'harmonisation, de coordination, de coopération à différents niveaux (locaux, régionaux, européens, nationaux, internationaux) sont critiques pour assurer la compatibilité, l'interopérabilité, l'interconnectivité, dans des conditions de sécurité et de sûreté conformes aux objectifs.
Cette exigence de cohérence doit aussi prendre en compte les normes et spécifications techniques et opérationnelles attachées à l'ensemble des autres recommandations.

Une standardisation systématique généralisée ou une uniformisation des concepts et des technologies des drones (comme pour les autres aéronefs) n'est ni réaliste, compte tenu de la diversité des aéronefs de différentes générations devant cohabiter à tout moment, ni souhaitable, car d'une part, elle nuit à l'émulation, à l'inventivité, aux ouvertures d'axes de progrès, à une concurrence productive, et d'autre part, elle peut avoir un impact négatif sur l'efficacité des machines, leur consommation d'énergie et les effets environnementaux.

La standardisation des stations sol et des affichages est nécessaire pour faciliter la prise en main du contrôle par les pilotes (et autres intervenants éventuels) au sol ainsi que leur formation, accroître l'efficacité du pilotage au sol, réduire le risque de mauvaise interprétation et/ou d'erreur, et donc augmenter le niveau de sécurité.

Les drones (comme les aéronefs en général) devraient en revanche bénéficier d'une souplesse et d'une tolérance adaptées, incorporées dans leurs propres systèmes et également dans les systèmes de leurs « interlocuteurs » (stations sol, autres aéronefs, ATC, aéroports, météo, …), afin de maximiser une cohabitation au sein d'une flotte hétérogène en constante évolution, et c'est une telle caractéristique d'adaptabilité qui devrait âtre généralisée !

Recommandation 3 **: La réglementation, les normes, les spécifications techniques et opérationnelles relatives aux drones, à leur intégration et aux stations-sol de commande/contrôle, doivent être coordonnées et harmonisées avec la souplesse nécessaire pour assurer simultanément la compatibilité, l'interopérabilité, l'interconnectivité et la sécurité.**

- Les développements technologiques des systèmes de détection-évitement (Sense & Avoid ou Detect & Avoid) ainsi que ceux des cartes numérisées des zones interdites et ceux des logiciels

définissant les volumes exclus de survol des drones, ou les zones géographiques d'écrasement, destinés à réduire les risques de collision en vol ou de dommages aux biens ou personnes au sol, doivent bénéficier des priorités, des investissements et des expérimentations nécessaires, des adaptations appropriées aux divers types de drones, en assurant la compatibilité nécessaire entre les divers aéronefs et avec les autres systèmes éventuellement impliqués (ATC, aéroports, stations-sol) tout en visant un certain degré de standardisation des systèmes au moins au niveau des grands drones et des avions pilotés à bord.

Recommandation 4 **: Les développements de systèmes de détection–évitement, d'exclusion automatisée de zones (survol, écrasement) doivent être traités de façon prioritaire avec le soutien financier nécessaire et dans un souci de standardisation globale.**

- Dans les opérations aéroportuaires, les questions délicates de partage des pistes entre avions pilotés à bord et avions sans pilote à bord devront faire l'objet d'études spécifiques car elles mettent en jeu les capacités des pistes.

Recommandation 5 **: Les questions de partage des pistes entre drones et autres aéronefs doivent aussi être traitées de façon prioritaire.**

- Compte tenu du nombre, de la diversité et des évolutions des drones amenés à fréquenter l'espace aérien futur, les procédures et les techniques d'identification des drones - déjà amorcées par diverses mesures prises ou prévues par certaines autorités - doivent être affinées, généralisées et harmonisées (au niveau administratif et intra-systèmes), de façon en particulier à faciliter le retour d'expérience, lequel doit lui-même faire l'objet de mesures appropriées. Ceci conditionne les évolutions et les progrès nécessaires à la fois au niveau technique et réglementaire pour atteindre les objectifs de niveaux de sécurité.

Recommandation 6 **: L'identification des drones et le retour d'expérience doivent faire l'objet de mesures appropriées.**

- Les capacités minimales en débit de transmission de données via les liaisons de commande-contrôle des drones devront être spécifiées, de manière cohérente avec les objectifs de sécurité associés selon le cas aux opérations en mode de fonctionnement normal ou en mode de contingence, et si nécessaire en fonction des phases de vol et des circonstances particulières (incluant les cas de pannes).

Recommandation 7 **: Les débits minimaux des transmissions des données nécessaires pour assurer avec sécurité le fonctionnement des drones devront être assurés, en fonction des cas et modes considérés.**

- Compte tenu d'une part des similitudes pouvant exister entre drones civils et militaires et d'autre part des applications mixtes possibles de certains drones, il apparaît utile d'assurer, lorsque ce n'est pas encore le cas, une cohérence et des systèmes pratiques de correspondances ou d'équivalences entre les divers documents réglementaires et spécifications civiles et militaires applicables notamment à la conception, à la fabrication et à la maintenance des aéronefs, des systèmes, des équipements, des logiciels, aux opérations, à la gestion du trafic aérien et aux aéroports, ainsi qu'aux processus de qualité, de suivi de configuration, de modification et de réparation, en identifiant quels documents devront s'appliquer à quelles classes de drones, civils ou militaires selon le cas. Ceci s'applique aux divers niveaux de réglementation, nationaux et internationaux inclus.

Recommandation 8 **: Les textes réglementaires et les spécifications relatifs aux drones civils et militaires doivent être rendus cohérents et aménagés de façon à faciliter les équivalences et les correspondances (dans le contexte d'utilisation mixte).**

- L'objectif d'atteindre de hauts niveaux de sécurité et d'efficacité doit guider les recherches prioritaires, qui devraient inclure celles visant à définir des critères, spécifications, exigences, normes pour la conception, la validation et la vérification des systèmes, architectures et logiciels adaptatifs, les méthodes de modélisation et simulation de tels systèmes, de formation adaptée avec « mise en confiance » des opérateurs, d'analyse des incidents et accidents. Poursuivant le même objectif, les recherches doivent aussi porter sur les rôles respectifs des personnels, des systèmes et des interfaces-clés, et leurs évolutions nécessaires pour opérer de tels systèmes.

Recommandation 9 **: Les activités de recherche doivent viser en priorité les sujets dont dépendent les niveaux de sécurité et d'efficacité attachés à l'utilisation des drones.**

- Il faut s'assurer que les bandes de fréquence utilisables par les drones soient quantitativement et qualitativement suffisantes pour assurer l'ensemble des fonctions dont dépendent les signaux concernés avec des niveaux de disponibilité et de sécurité conformes aux objectifs. Ceci suppose une participation active et efficace des experts et responsables concernés au sein des organismes traitant de ces sujets et auprès des instances dotées du pouvoir de décision, aux niveaux national, européen et international, avec à la clé la reconnaissance et l'acceptation des besoins correspondants, leur transcription dans les clauses des textes officiels appropriés et leur mise en œuvre concrète.

Recommandation 10 **: Les questions de spectre de fréquence utilisable par les drones doivent être traitées dans les instances concernées avec un souci d'efficacité à la mesure des enjeux de disponibilité et de sécurité.**

CONCLUSIONS - VISION GLOBALE

Peut-on envisager un apport conséquent des drones à une aviation plus automatique et interconnectée dans le futur ?…Réponse : oui. Pourquoi ?...

Les petits drones civils d'aujourd'hui ont très peu à voir avec l'aviation de transport de passagers, et leur impact potentiel direct est très limité dans ce secteur. Toutefois nous avons déjà souligné l'apport potentiel spécifique des drones militaires, paradoxalement plus proches sous certains aspects que les drones civils actuels des avions commerciaux, et par ailleurs, **nous avons identifié une application directe possible des drones au transport de marchandises à long terme**, même si cet apport reste difficile à apprécier qualitativement et quantitativement (types de transports, de missions, charges transportées, etc. ?), et d'une manière générale, **nous avons estimé que la probabilité d'une contribution significative des drones de grande dimension à l'aviation de transport à l'horizon 2050 était faible**.

Cependant, au niveau des impacts *indirects*, il faut prendre en compte les multiples effets stimulants mentionnés ci-dessus, autour des développements conceptuels, méthodologiques, technologiques, opérationnels, industriels et commerciaux, des besoins, des applications et services dans divers secteurs comme celui des télécommunications par exemple, avec des débouchés potentiels significatifs à l'horizon 2050.

L'effet d'entraînement associé au développement des drones civils et militaires pourrait ainsi avoir des effets vertueux en dynamisant et consolidant, à long terme, la filière aéronautique toute entière, où apparaîtrait un nouveau pôle attractif, source de synergies et d'effets-rebonds dans la recherche, l'industrie, la commercialisation, la dualité militaire-civil, avec à la clé une amplification et une accélération des développements technologiques, des solutions techniques et des débouchés socio-économiques.

Les drones offrent des bases de pré-développement idéales pour les automatismes futurs, à coûts, délais et risques réduits, leur donnant un rôle irremplaçable de facilitateur et accélérateur de solutions techniques innovantes, synergies et débouchés socio-économiques. Les drones constituent par conséquent une source d'apports potentiels importante pour une aviation plus automatique et interconnectée dans le futur.

…Apport d'autant plus significatif que…

…nous pouvons anticiper une évolution des drones, déjà amorcée, dans le sens d'une augmentation de leur nombre et de leur taille, d'une diversité accrue d'applications, d'une complexité et d'un degré de sophistication de plus en plus grands, d'une fiabilité améliorée, d'interactions potentielles de plus en plus importantes avec le reste du trafic aérien, mais qui seront maîtrisées par nécessité. Les efforts de recherche, les progrès spectaculaires incessants dans tous les domaines techniques concernés, les grands chantiers lancés en matière de réglementation, la prise de conscience par l'ensemble des acteurs concernés de l'importance du potentiel, des défis et des enjeux, la collaboration étroite amorcée entre eux tous sont des facteurs propices. Parallèlement, l'aviation évolue et continuera d'évoluer vers plus d'automatisation, d'autonomie et d'interconnectivité, les fonctions de pilotage des aéronefs futurs vont être repensées. Dans ces conditions, il est vraisemblable que les problématiques des drones et des autres aéronefs vont s'imbriquer de plus en plus, et que la réglementation devra les englober dans un ensemble cohérent (démarche également amorcée). *Il est donc légitime de penser qu'**au fur et à mesure de ces évolutions conjointes, à l'imbrication croissante, l'écart initial entre le monde des drones et celui de l'aviation commerciale va s'estomper, que les réflexions portant sur les deux domaines vont se rapprocher et finalement se fondre dans une réflexion globale unique. Ceci ne peut que renforcer l'apport potentiel des drones.***

…Apport dont l'importance et la qualité sont tributaires de moyens et priorités de recherche adaptés…

Un développement et un déploiement harmonieux et efficace des drones reposent sur certaines conditions et la levée d'un certain nombre de barrières, comme mentionné dans le rapport US : « Autonomy Research for civil aviation » (cf. présentation lors du colloque de novembre 2014 à Paris).

Ce rapport, tout en notant que les opérations de l'aviation civile sont à l'aube de ***changements profonds du fait de l'évolution rapide des systèmes « de plus en plus autonomes »*** et de leurs bénéfices potentiels, alerte à juste titre sur les ***risques d'en sous-estimer les conséquences imprévues, la difficulté d'intégrer les avancées technologiques en améliorant simultanément la sécurité et l'efficacité***. Le rapport, qui répertorie les barrières à surmonter, appartenant à diverses catégories, d'ordre technique, réglementaire et sociétal (cf. annexe 2), enjoint de leur **attribuer des priorités dans les activités de recherche correspondantes**, indispensables pour les surmonter. Cela implique évidemment que des moyens de recherche appropriés doivent être mis en place.

…Sachant que d'autres défis devront être relevés en chemin…

…tels les ***défis croisés des critères, du retour d'expérience et de la prise en compte de la situation très évolutive pour les drones***.

Il y a, entre avions militaires, avions commerciaux, drones militaires, drones civils de petite taille et drones civils futurs commerciaux, des décalages entre critères de sécurité, retours d'expérience

disponibles (cf. annexe 3): ces retours sont plus ou moins clairsemés et/ou incomplets, et s'inscrivent dans un contexte inapplicable ou très difficile à projeter d'un secteur à un autre, ou dans le futur, du fait des incertitudes liées à la situation très évolutive et extrêmement variée des drones concernant de multiples facteurs (nombre, caractéristiques, performances, taille, masse, autonomie, utilisation opérationnelle, équipements à bord et au sol, capteurs, moyens de communication, signaux de commande et contrôle, fiabilité prévisionnelle, niveaux de sécurité, modes de pilotage, modes d'opération dégradés, formation et qualification des pilotes, espace utilisé, réglementation applicable,..).

…En coordonnant les divers aspects et en ayant recours à la coopération d'experts indispensables

Le sujet des drones est encore très « jeune ». ***La question de leur apport potentiel a de multiples facettes et touche des domaines très évolutifs : cette question ne peut être approfondie qu'en étroite coordination avec les autres aspects généraux de l'aviation plus automatisée et interconnectée***, en ***consolidant les données et les analyses, tout en assurant un suivi critique des activités et des évolutions dans les différents domaines*** : recherche, technologie, expérimentations, développements, réglementation, études de fiabilité et sécurité, retours d'expérience opérationnelle, jusque dans les domaines connexes concernés (télécommunications, spatial, juridique, assurances,…) et aux différents niveaux : local, national, régional, européen et international.

Tout ceci ***implique un travail conséquent et exigeant de recueil, analyse, synthèse et échanges de données et informations multiples, en collaboration étroite avec les experts concernés.***

L'ensemble des conditions évoquées ci-dessus sous-tendent les recommandations auxquelles nos réflexions nous ont conduits.

Cette démarche devrait nous permettre d'affiner progressivement notre réflexion et nos recommandations.

Annexe 1 : Références documentaires

Articles

- La problématique générale des drones (Lettre 3AF – 4/5/2014) - H. Michel
- Réglementation et questions de sécurité (extrait de la REE 2014-3) - G. Mardiné
- L'utilisation civile des drones – problèmes techniques, opérationnels et juridiques (Fondation pour la Recherche Stratégique – 28/03/2008) – M. Asencio
- Europe's UAV Experience – Diversity in search of harmony (cf. site Inside GNSS – Spring 2014) - P. Gutierrez
- "Could a Jet Engine Survive Sucking a Drone?" – UAS-Vision (19/03/2015)
- European Cockpit Association (ECA) Position Paper - The RPAS 'Open Category' in EASA's Concept of Operations for Drones (23/07/2015)
- Drones must be safe – says aviation industry – European Cockpit Association (ECA) – Press Release (05/09/2016)
- Industry Welcomes FAA Small UAS Rule – Aviation Week (09/09/2016)
- First Meeting of Drone Advisory Committee (DAC) – UAS-Vision (16/09/2016)
- Testing For FAA Sheds Light On UAS Collision Risks – Aviation Week (20/09/2016)

Présentations et Colloques

- Drones : l'invasion maitrisée ? Présentation par Philippe Cazin haut conseiller à l'ONERA et membre de l'Académie de l'Air et de l'Espace, Présentation à la médiathèque José Cabanis de Toulouse le 20 Janvier 2015
- « Présent et futur des drones civils » : Colloque international AAE-3AF (DGAC, Paris, 13-14 novembre 2014, retransmis en direct à l'Ecole Nationale de l'Aviation Civile (ENAC) à Toulouse

Rapports

AAE

- Dossier n° 40 (3AF - Cahier n°16) - Présent et futur des drones civils

DGAC

- Arrêtés de mai 2012 concernant les drones
- Arrêté du 17 décembre 2015 relatif à la conception des aéronefs civils qui circulent sans personne à bord, aux conditions de leur emploi et aux capacités requises des personnes qui les utilisent
- Arrêté du 17 décembre 2015 relatif à l'utilisation de l'espace aérien par les aéronefs qui circulent sans personne à bord

Commission Européenne

- Roadmap for the integration of civil Remotely-Piloted Aircraft Systems into the European Aviation System (June 2013), *avec 3 annexes*
- Communication de la Commission au Parlement et au Conseil – Une nouvelle ére de l'aviation – Ouvrir le marché de l'aviation à l'utilisation civile de systèmes d'aéronefs télépilotés, d'une manière sûre et durable – COM(2014) 207 final (08/04/2014)
- Privacy, data protection and ethical risks in civil RPAS operations - D3.3: Final report for the European Commission (07/11/2014)
- Opinion of the European Data Protection Supervisor on COM(2014) 207 (26/11/2014)
- Riga Declaration on Remotely Piloted Aircraft (drones): "Framing the Future of Aviation" (06/03/2015)
- Opinion 01/2015 on Privacy and Data Protection Issues relating to the Utilisation of Drones (16/06/2015)

Parlement européen

- Rapport sur l'utilisation sûre des systèmes d'aéronefs télépilotés (RPAS) - AB-0261/2015 – Commission des transports et du tourisme (25/09/2015)

EUROCAE

- ER-010 (July 2013) - UAS/RPAS Airworthiness Certification « 1309 » System Safety Objectives and Assessment Criteria

EUROCONTROL

- Specifications for the use of military remotely piloted aircraft as operational air traffic outside segregated airspace – Spec 0102 (ed. 2.0 01/02/2012)

AESA (EASA)

- Notice of Proposed Amendment NPA 16/2005 & Comment-Response Document CRD 16/2005 : Policy for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) certification

- Notice of Proposed Amendment NPA 2012-10 (21/04/2012) & Notice of Proposed Amendment NPA 2014-09 (03/07/2014): Transposition of Amendment 43 to Annex 2 to the Chicago Convention on RPAS into common rules of the air
- Communication COM (2014) 207 (08/04/2014) : Opening the aviation market to the civil use of RPAS in a safe and sustainable manner
- Note du 12/03/2015 : Concept of Operations for Drones - A risk based approach to regulation of unmanned aircraft
- Advance Notice of Proposed Amendment 2015-10: Introduction of a regulatory framework for the operation of drones (31/07/2015)
- Technical Opinion: Introduction of a regulatory framework for the operation of drones - Related to A-NPA: 2015-10 - (18/12/2015)
- 'Prototype' Commission Regulation on Unmanned Aircraft Operations and Explanatory Note (22/08/2016)

JARUS (Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems)

- Certification Specification for Light Unmanned Rotorcraft Systems (CS-LURS) JARUS WG-3 Airworthiness - Version 1.0 – 30/10/2013
- RPAS C2 link Required Communication Performance (C2 link RCP) concept - JARUS WG 5 Final issue – 10/10/2014

FAA / Joint Planning and Development Office (JPDO)

- .Integration of Civil Unmanned Aircraft Systems (UAS) in the National Airspace System (NAS) Roadmap – First Edition - 2013
- Unmanned Aircraft Systems (UAS) Comprehensive Plan *A Report on the Nation's UAS Path Forward* - September 2013
- Billing Code 4910-13-P - Registration and Marking Requirements for Small Unmanned Aircraft - Rule effectivity: 21/12/2015
- Advisory Circular AC N¨107-2 - Small Unmanned Aircraft Systems (sUAS) – 21/06/2016
- Billing Code 4910-13-P - Operation and Certification of Small Unmanned Aircraft Systems – RIN 2120-AJ60 – Final Rule – 21/06/2016
- FAA News – Summary of Small Unmanned Aircraft Rule (Part 107) – 21/06/2016

OACI/ICAO

- Circular Cir 328 (AN/190) : Unmanned Aircraft Systems (UAS) – 2011 NRC (National Research Council: Committee on Autonomy Research for Civil Aviation Aeronautics and Space Engineering Board)
- Autonomy Research for Civil Aviation: Toward a New Era of Flight, National Academies Press 2014

OTAN/NATO

- NSA Standardization Agency - Standardization Agreement (STANAG 4671) – UAVs Systems Airworthiness Requirements (USAR) – (03/09/2009)

FPDC : *se reporter au site internet*
UVSI : *se reporter au site internet*
UAVSI : *se reporter au site internet*
ANFR (Agence Nationale des Fréquences) : *se reporter au site internet*
TNRBF (Tableau national de répartition des bandes de fréquences) : *se reporter au site internet*
CMR (Conférence Mondiale des Radiocommunications) : *se reporter au site internet*
CEPT (Conférence Européenne des Postes et Télécommunications) :*se reporter au site internet*
UIT/ITU (Union Internationale des Télécommunications) : *se reporter au site internet*

ARCEP (Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes) : *se reporter au site internet, et :*

- RTCA, DO-304, Guidance Material and Considerations for Unmanned Aircraft Systems 03-22-07

SESAR: *se reporter au site internet*

UAS Safety Analysis – Exponent, Inc.

- Project n°1408989.EX0 – 16/12/2014 (Adam Dershowitz)

Bard College – Center for the Study of the Drone:

- Drone Sightings and Close Encounters - An Analysis (11/12/2015)

Publications diverses

- Les drones aériens : passé, présent et avenir – Approche globale – Centre d'études stratégiques aérospatiales - La Documentation Française - 2013
- Théorie du drone – Grégoire Chamayou – Editions La fabrique – 2013
- Les drones aériens – Lionel Chauprade – Cépaduès Editions – 2014
- Les drones - La nouvelle révolution – Rodolphe Jobard – Editions Eyrolles – 2014
- Les drones débarquent ! – Paul Guermonprez – Editions fyp – 2014
- Confucius et les automates - L'avenir de l'homme dans la civilisation des machines – Charles-Edouard Bouée (en collaboration avec François Roche) – Editions B. Grasset – 2014

Sites et documents internet dédiés

http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/aerospace/uas/

https://www.easa.europa.eu/

http://www.sesarju.eu/

http://jarus-rpas.org/

http://www.federation-drone.org/

http://www.uasvision.com/

https://www.eurocontrol.int/rpas

http://www.eurocontrol.int/articles/rpas-big-picture

http://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/tnrbf/DR-02_13-Mod1__-_Version_modifiee_le_21_juin_2013__publique_.pdf

,http://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/tnrbf/DR-02_13__Annexe_7__AFP_.pdf

http://www.arcep.fr/

http://www.anfr.fr/fr/anfr.html

http://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/tnrbf/DR-02_13-Mod3__-_Version_du_18_septembre_2014.pdf

http://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/tnrbf/DR-02_13-Mod2__-_Annexe7.pdf

http://www.cept.org/

http://www.itu.int/

http://uvs-international.org/

file:///D:/T%C3%A9l%C3%A9chargements/11_UVSI_Background&Activities_140306_Brochure_LR%20(1).pdf

https://www.faa.gov/uas/

www.nap.edu

http://www.auvsi.org/

http://www.insidegnss.com/auto/IUS_0414%20Europe.pdf

http://insideunmannedsystems.com/

https://www.eurocockpit.be/

Annexe 2 : Les Défis majeurs à relever dans le développement des Drones

Réglementation, sécurité, sûreté, législation et régimes d'assurances

Les drones se développent, leur nombre et leurs applications se multiplient à un rythme que la réglementation, en Europe, aux USA et ailleurs, a du mal à suivre. Ceci peut avoir un effet de frein, car des réticences sont très perceptibles dans la sphère publique, avec la crainte, réelle ou psychologique, des conséquences de la chute d'un drone, d'une collision ou d'une atteinte à la vie privée.

Les risques sécurité, cybersécurité et sûreté doivent être pris en compte, d'autant plus que le faible ratio potentiel-performances / coûts peut faciliter des opérations mal ou insuffisamment contrôlées, des actes illicites ou terroristes. En outre, la fiabilité paraît être un point faible aujourd'hui (voir plus loin), et même si elle s'améliore dans le futur, grâce à l'accumulation d'expérience, à la réglementation combinée à la pression du public, il reste à savoir jusqu'où peut aller l'amélioration, sachant que l'on est très loin des objectifs à satisfaire dans le domaine de l'aviation civile, comme on le verra ci-après.
Le sujet de la réglementation est difficile car celle-ci doit / devra prendre en compte : i) une grande variété de nouveaux objets volants, ii) des opérations très diverses, nécessitant des classifications appropriées (évoquées ci-dessous, en particulier dans la figure 1, en tant que concept), iii) les interférences de ces objets et de leurs opérations avec les aéronefs « classiques » et leurs opérations (problème de l'insertion des drones dans le trafic), et par ailleurs, iv) couvrir une nouvelle gamme de risques (intrusion dans la vie privée) , lesquels débordent du domaine aéronautique habituel, impliquant de nouvelles interfaces, notamment avec des secteurs administratifs, juridiques et législatifs (y compris questions de responsabilité civile et assurances), nécessitant l'ouverture de nouveaux sujets de réflexion, de nouvelles rubriques, l'élaboration de textes nouveaux ou modifiés, et des actions de coordination particulières.
Le rapport US : « Autonomy Research for civil aviation » du « National Research Council of the National Academies » (2014) présenté lors du colloque AAE-3AF de novembre 2014 à Paris (« Présent et futur des drones civils ») répertorie les barrières techniques, réglementaires et sociétales suivantes :

Barrières techniques et réglementaires :

- Communications / acquisition de données / bande passante
- Sécurité, y compris cybersécurité
- Diversité des aéronefs / rétrocompatibilité avec les éléments existants du trafic
- Intégration Homme-Machine
- Pratique et prise de décision avec des systèmes adaptatifs / non-déterministes
- Capacité de détection, perception, cognition au niveau des machines
- Complexité et résilience, approches et méthodes de vérification-validation des systèmes sophistiqués
- Accès des drones à l'espace aérien non ségrégué : autorisations/dérogations
- Prise en compte des systèmes sophistiqués dans les approches / processus / critères / de certification
- Niveau de sécurité équivalent : normes à adapter aux opérations des drones
- Confiance dans les systèmes adaptatifs/non-déterministes : vérification, validation et certification sont des conditions nécessaires mais non suffisantes pour créer la confiance dans les systèmes adaptatifs/non-déterministes.

Barrières sociétales :

- Problèmes juridiques et sociétaux liés à la sécurité et à la protection de la vie privée : risque d'entrave dans le degré et la vitesse d'adoption des technologies de plus forte automatisation-autonomie.

Ce même colloque a souligné que la réglementation devait être établie de manière proportionnée au risque, accompagner le développement technologique, en évitant le piège d'être trop prescriptive, qu'elle devait se décliner aux différents niveaux (européen, national, local), tout en restant harmonisée au niveau européen.

La bande de fréquence radio utilisée pour le fonctionnement des drones représente un défi particulier, objet d'une réglementation spécifique à développer et affiner, et qui affecte aussi les équipements de bord des drones.

La formation des pilotes représente un autre défi que l'on a commencé à prendre en compte, avec un volet réglementaire.

Toutes les questions réglementaires, touchant les drones, leurs équipements, les éléments d'interface et communication (y compris les aspects de fréquence radio), les autres aéronefs (du fait des mises à jour nécessaires pour tenir compte des drones), sont à traiter aux différents niveaux : local, national, régional (européen) et international (OACI en particulier).

Avec des objets tels que les drones, aux caractéristiques, modes opératoires, conditions opérationnelles et missions très variés et évolutifs, il faut prévoir d'autres défis à affronter « en cours de route ».

Cette diversité, source de complexité, conduit à envisager des classifications, selon les caractéristiques et conditions d'utilisation des drones, pour rendre lisible et pratique le dispositif réglementaire. Ceci apparaît déjà dans les textes des règlements préliminaires mis en place.

La figure 1 ci-dessous présente schématiquement ce que pourrait être un processus de classification des drones. Un tel schéma reste à consolider et développer.

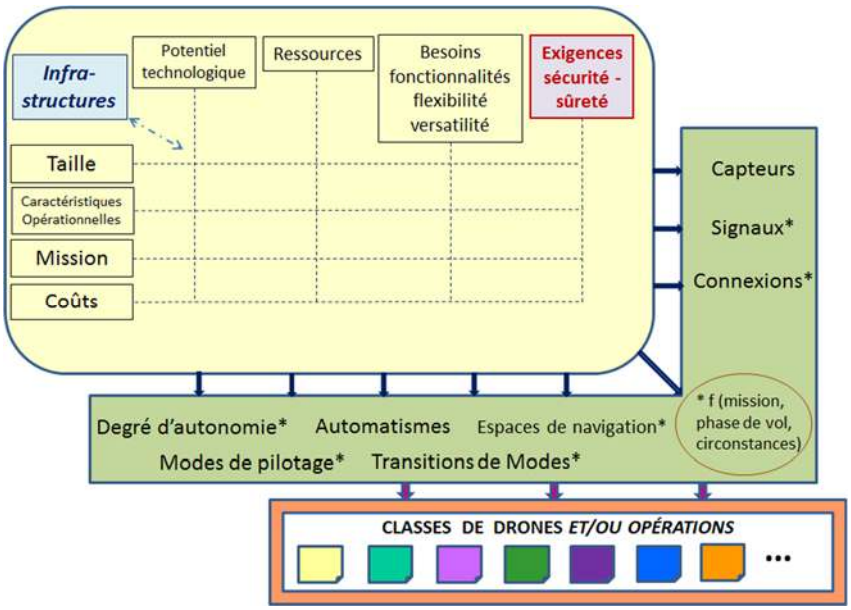


Fig. 1 Classification possible des drones

Autres freins potentiels

Comme cela a été exprimé lors du colloque de novembre 2014 et dans les réponses au sondage organisé à cette occasion, la fragmentation du marché européen, la fragilité structurelle et économico-financière du tissu des PME, la forte concurrence internationale, combinés au risque de sous-investissement dans la recherche et le développement, sont autant de risques qui pèsent sur le développement de la filière européenne des drones de petite taille, qui peuvent aussi par rebond impacter le développement de « gros drones » civils. Cependant, les ambitions de recherche et développement dans le domaine des drones militaires européens, perceptibles à travers l'accord signé entre français et-britanniques, devraient avoir des retombées bénéfiques (technologies, synergies, investissements industriels, etc.).
Le colloque a également mis en évidence les besoins technologiques importants en matière de *systèmes/capteurs de détection-évitement*, de miniaturisation des équipements, de logiciels de traitement intégral des données et de solutions globales intégrées et adaptées tout cela conditionnant la pertinence des décisions et donc la productivité et la valeur ajoutée recherchées par les utilisateurs.
On notera les interdépendances entre les multiples facteurs concernés, comme par exemple entre les risques d'un marché européen trop fragmenté et ceux d'une réglementation insuffisamment harmonisée au niveau européen.

Dans tous les cas, indépendamment de leur apport, le transport aérien doit « au minimum » prendre en compte les drones existants et à venir, quelle que soit leur taille et leur utilisation

Les conséquences seront évidemment différentes selon les types de drones à prendre en compte, mais dans tous les cas, les drones vont se développer, même si des drones commerciaux de transport ne voient pas le jour dans la période considérée, et il semble très improbable que l'évolution s'arrête ou s'inverse. Comme cela a déjà été mentionné ci-dessus, les réglementations locales, nationales, régionales et internationales vont nécessairement devoir accompagner ce développement. Cela inclut la mise à jour indispensable des réglementations existantes concernant les aéronefs pilotés de manière classique ou intermédiaire, compte tenu des interférences et des interactions possibles.

Annexe 3 : Expérience des drones

En matière d'exigences et d'expérience opérationnelle concernant les drones actuels, civils et militaires, notamment en termes de fiabilité et de sécurité, un certain nombre de données peuvent être analysées, pouvant donner lieu à certaines transpositions, mais de portée limitée, à cause des différences très significatives inhérentes aux conditions propres à chaque catégorie, et à cause des manques de précision ou des restrictions relatifs à une partie de ces données. Ceci nécessite une grande circonspection.

La figure 2 ci-dessous schématise de manière simpliste et préliminaire les flux théoriques possibles dans le transfert d'expérience et d'exigences entre avions et drones, dans la perspective d'une projection des éléments pertinents pour les drones commerciaux futurs, si tant est qu'ils voient le jour.

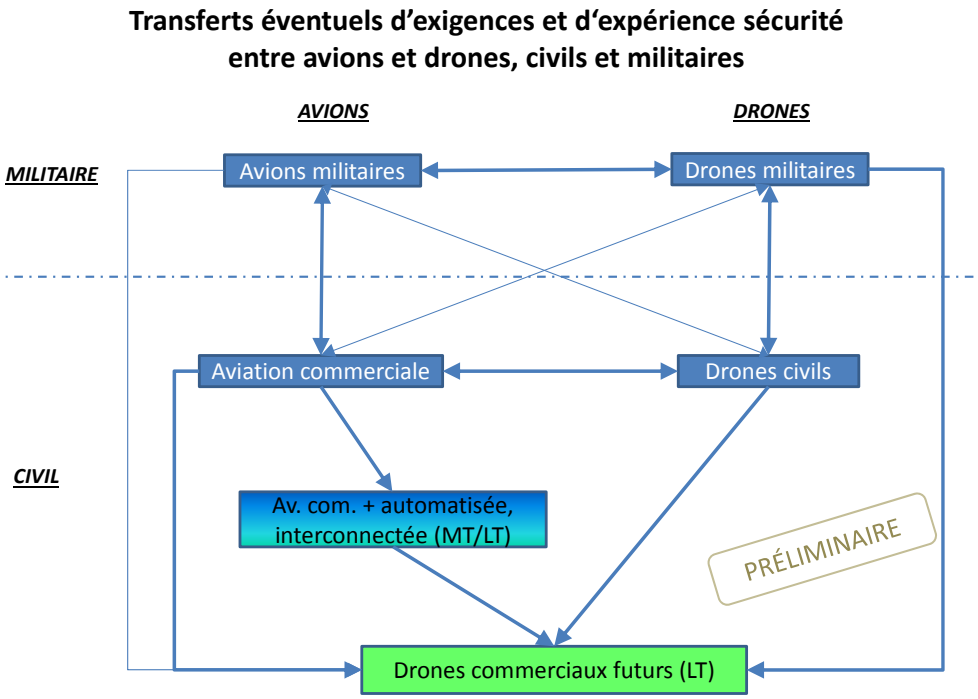


Fig. 2 Transferts d'exigences et expérience entre avions et drones
(MT = Moyen Terme ; LT = Long Terme)

En termes de taille, coût, sophistication de systèmes, exigences de formation des pilotes, postes de pilotage, performances, expérience opérationnelle, les drones civils commerciaux futurs pourraient se rapprocher (en relatif !) des drones militaires

Cependant, les seuls chiffres connus relatifs aux drones militaires et civils semblent indiquer une situation sans commune mesure (taux de crash beaucoup plus élevés : voir ci-après) par rapport à l'aviation commerciale**.** En outre, les données du domaine civil ne semblent pas faire l'objet d'études de fiabilité spécifiques et à plus forte raison d'études synthétiques globales, et celles du domaine militaire sont par définition difficiles à obtenir, parcellaires et peu détaillées, du fait des conditions d'utilisation / environnements particuliers et des questions de confidentialité.

On peut penser que les chiffres de fiabilité des drones pourraient évoluer rapidement dans un sens plus favorable, mais jusqu'à quel point et quand ?

Une analyse objective devrait reposer sur une comparaison entre objectifs de sécurité / fiabilité globale, fiabilité systèmes / sous-systèmes (analyses de sécurité), entre résultats d'expérience observés (y compris crash et collision), prenant en compte selon le cas les aspects techniques, opérationnels, (dont commande/contrôle/détection/évitement), réglementaires, facteurs humains et formation, problèmes de météo, gestion du trafic, etc. Mais pour l'instant, on ne dispose pas de bases de données suffisantes, fiables et bien structurées / détaillées.

L'annexe 3, qui tente d'aborder les éléments d'approche analytique et les problématiques liés à la fiabilité et à sécurité des drones, devrait aider à percevoir la complexité du sujet et le chemin restant à parcourir.

En termes de critères, exigences et objectifs de sécurité, les drones commerciaux devraient s'apparenter aux avions commerciaux

Les critères, exigences et objectifs de sécurité relatifs aux avions militaires (risque d'écrasement par exemple) semblent plus apparentés à ceux concernant les drones civils de petite taille.

Les objectifs des drones militaires ne sont pas applicables aux drones commerciaux futurs de ce point de vue.

Les risques de collision sont à prendre en compte dans toutes les configurations (y compris avec des drones de taille petite ou moyenne), à l'intérieur d'une catégorie comme entre catégories, avec des degrés de sévérité différents selon les conséquences.

Les transferts d'expérience sont possibles, mais difficiles

Expérience des drones militaires US

On a dénombré plus de 400 écrasements de 2001 à mi-2014, dont environ la moitié de classe A[150], en $4x10^6$ heures soit un taux de l'ordre de **10^{-4} / heure.** Il est important de noter que beaucoup de cas se sont produits dans des zones de combat et des conditions d'utilisation hostiles, ceci altérant donc la validité de la transposition.

Plusieurs cas de perte de liaison/contrôle et disparition du drone doivent sans doute y être rajoutés.

Plusieurs cas de collision ou de quasi-collision ont été signalés avec des avions civils et militaires, sans conséquences graves apparemment à ce jour.

On note que le taux d'écrasements a un peu diminué au cours des cinq dernières années (de l'ordre de 2 à 5.10^{-5}), mais globalement, le commandement militaire US estime qu'il y a un ordre de grandeur (facteur 10) dans le nombres d'accidents de classe A des drones militaires, comparé aux avions militaires pilotés à bord.

On n'a pas eu connaissance des rapports d'investigation détaillés ni de l'analyse précise des circonstances et des causes, qui seuls auraient permis d'approfondir la réflexion à partir de ces expériences.

Quelle leçon tirer des expériences connues, par rapport à de futurs drones commerciaux ?

Les conditions opérationnelles ne sont pas directement transposables !

Pour diverses autres raisons, liées notamment aux dimensions, aux exigences et pratiques de construction, essais et validation, aux conditions opérationnelles, l'expérience des drones civils de petite taille ne l'est pas non plus!

Il semble que l'on soit conduit à adopter une approche novatrice en matière d'objectifs de sécurité pour les drones, combinant la prise en compte des caractéristiques, des conditions opérationnelles, et bien entendu des risques spécifiques associés, de différentes natures (écrasement au sol avec atteinte aux biens et aux personnes, ou collision en vol avec un autre aéronef).

[150] Avion détruit ou dommages ≥ 2M €

Cela peut inclure une segmentation dans les caractéristiques (masse du drone) et dans l'espace (altitude, espaces ségrégués, zones de densité de population plus ou moins grande). Une approche par scénario est également envisageable.

Du fait de l'expérience à accumuler progressivement dans ces nouveaux « territoires », une approche séquentielle peut en outre s'avérer nécessaire dans le temps, permettant, graduellement, d'étendre, de manière simultanée et optimale, les capacités technologiques (en termes de disponibilité) et opérationnelles (en termes d'opérations autorisées) des drones,

Compte tenu du fractionnement vraisemblable des exigences réglementaires à venir dans différentes dimensions, il sera donc d'autant plus important de viser une coopération étroite et des approches coordonnées entre autorités, une harmonisation internationale, pour éviter des situations disparates, sources de conflits, d'iniquité et d'insécurité.

Des drones pourront-ils égaler les avions commerciaux en termes de fiabilité/sécurité ? Il est difficile de répondre aujourd'hui à cette question, mais notre sentiment est que le chemin paraît long et semé d'embûches,

D'une manière générale, la réglementation applicable aux drones de plus grande taille volant dans les mêmes espaces aériens que les autres aéronefs sera plus longue et complexe à établir, car elle nécessitera des études plus complètes et approfondies de sécurité / interopérabilité / compatibilité.

- La question de l'impact des drones militaires et civils sur la sécurité aérienne, civile et militaire se pose dans tous les cas.

- Un besoin crucial conditionnant un essor harmonieux des drones civils : un retour d'expérience systématique, rigoureux, précis et réglementé. Cette exigence est d'ores et déjà intégrée dans les dispositions réglementaires en cours d'élaboration.
En effet, comme cela a été exprimé précédemment, les drones existent, il y en a et il y en aura de plus en plus, et leur insertion dans le trafic aérien, y compris pour les drones de petite taille, nécessite des actions appropriées à divers niveaux, notamment en matière de réglementation, pour prendre en compte les réalités présentes et anticiper le futur en minimisant les risques.

Annexe 4 : Problématique de Fiabilité-Sécurité des Drones

Une tâche ardue et exigeante

L'étude préliminaire qui sous-tend le présent rapport a permis d'entrevoir la difficulté de la tâche qui consiste à traiter des questions de fiabilité et sécurité des drones, avec l'objectif d'établir des critères robustes et d'élaborer une réglementation rationnelle, rigoureuse, cohérente, accompagnée de processus de certification et de méthodes de démonstration de conformité pratiques et précises. Ceci est dû en particulier aux facteurs suivants :

- multiplicité et diversité des véhicules et de leurs opérations, des types de risques à couvrir ;

- multiplicité et diversité des acteurs concernés : scientifiques, chercheurs et universitaires, concepteurs/expérimentateurs, constructeurs, opérateurs, donneurs d'ordre, agences gouvernementales et internationales (y compris réglementation de l'aviation civile, gestion du trafic aérien, de la navigation et des communications), juristes, et assureurs spécialisés ;

o recueil et analyse difficiles des données « en utilisation » (dispersion, hétérogénéité, imprécision, incomplétude) ;

o élargissement forcé du champ des sujets à traiter, qui débordent du périmètre habituel de l'aéronautique civile (exemple : protection de la liberté individuelle) ;

o défi que représente l'exigence de cohérence à respecter et d'efficacité d'action à assurer, vis-à-vis de l'évolution du cadre réglementaire et des règlements existants, nécessitant notamment la prise en compte des questions d'intégration et d'interrelations, au niveau des sujets à couvrir, parallèlement à une détermination et des efforts intenses de coordination, harmonisation et convergence de la part des acteurs à tous les niveaux : interdisciplinarité; coordination et coopération inter et intra - niveaux local, régional, national, européen et international.

Quelques rappels fondamentaux de l'OACI : Extraits de la Circulaire 328

2.5 ICAO recognizes many categories of aircraft, among them balloons, gliders, aeroplanes and rotorcraft. Aircraft can be land, sea or amphibious. Whether the aircraft is manned or unmanned does not affect its status as an aircraft. Each category of aircraft will potentially have unmanned versions in the future. This point is central to all further issues pertaining to UA and provides the basis for addressing airworthiness, personnel licensing, separation standards, etc.

2.8 The principal objective of the aviation regulatory framework is to achieve and maintain the highest possible uniform level of safety. In the case of UAS, this means ensuring the safety of any other airspace user as well as the safety of persons and property on the ground.

2.15 The lack of an on-board pilot introduces new considerations with regard to fulfilling safety-related responsibilities such as incorporation of technologies for detect and avoid, command and control, communications with ATC, and prevention of unintended or unlawful interference.

3.1 UAS will operate in accordance with ICAO Standards that exist for manned aircraft as well as any special and specific standards that address the operational, legal and safety differences between manned and unmanned aircraft operations. In order for UAS to integrate into non-segregated airspace and at non-segregated aerodromes, ***there shall be a pilot responsible for the UAS operation****. Pilots may utilize equipment such as an autopilot to assist in the performance of their duties; however,* ***under no circumstances will the pilot responsibility be replaced by technologies in the foreseeable future****.*

Notion de risque-sécurité associée à un accident de drone

Pour les drones existants, de relativement petite taille, ne transportant ni pilote ni passagers, le risque sécurité se limite au risque pour les personnes et les biens au sol, en cas d'écrasement, ou de collision avec un avion commercial civil (l'un ou l'autre pouvant être provoqué par une action malveillante). Pour un drone civil futur éventuel transportant des passagers, le risque est semblable à celui qui affecte les avions commerciaux civils. Il y a donc un changement de paradigme, au niveau des objectifs à atteindre, qui devra se traduire aussi au niveau de la règlementation. En outre, un changement d'échelle de sévérité devra nécessairement être pris en compte quant aux effets liés à un drone de plus grande taille, même sans passagers.

Ce caractère éminemment évolutif de la notion de risque sécurité des drones constitue un élément clé de l'approche analytique de la fiabilité-sécurité évoquée dans ce Livret.

Eléments taxonomiques et autres, en préalable à une approche analytique de fiabilité et sécurité des drones

Les approches règlementaires aux différents niveaux (nationaux, européens, internationaux) ont été et sont amenées, pour des raisons techniques et pratiques, à faire des segmentations selon différents axes, pour les drones de différents tailles et modes opératoires. A ces découpages sont nécessairement associés des éléments techniques, probabilistiques et statistiques inhérents aux analyses de fiabilité et sécurité des drones.
Les règlements en vigueur et les études règlementaires actuelles portent sur les drones de taille relativement réduite, correspondant aux drones en opération. On peut prévoir que les règlements futurs vont évoluer en même temps que les drones, avec un temps d'anticipation (idéal souhaitable…), ou, plus probablement, comme c'est le cas aujourd'hui, avec un certain retard.

Dans tous les cas, la situation est **très évolutive**, et plus les drones grossiront, évolueront dans leurs capacités, leurs fonctions, leurs usages opérationnels et prendront de l'importance dans le trafic aérien, plus la règlementation des drones devrait inéluctablement se rapprocher de celle des autres aéronefs, tandis que cette dernière devra être aménagée de façon adéquate pour prendre en compte les « nouveaux venus », dans une démarche d'intégration qui devrait respecter la cohérence et l'efficacité. Les catégorisations et les autres éléments ci-dessous, inspirés des études réglementaires actuelles, ne sont donc donnés qu'à titre indicatif, et devront être revus et complétés de façon systématique.
Les analyses de fiabilité et de sécurité, comme la réglementation elle-même combinent évidemment les différentes catégories en fonction des conditions opérationnelles et des diverses contraintes.

Les catégories et seuils mentionnés ci-dessous ne prétendent pas être exhaustifs et sont basés sur divers documents publiés à ce jour. Non seulement ces informations sont susceptibles d'évoluer, mais il est très probable qu'elles évolueront.

L'annexe 4 fournit, en complément de l'annexe 3, la feuille de route européenne pour la réglementation, en ce qui concerne seulement l'activité d'harmonisation des objectifs civils-militaires de sécurité (relatifs aux risques pour des personnes au sol). Ceci ne représente qu'une parmi les huit tâches directement liées à la sécurité/navigabilité, lancées d'ici 2018, faisant partie d'un total de trente-huit tâches d'amélioration réglementaire (RI : Regulatory Improvement) lancées d'ici à 2028, ceci donnant un aperçu de l'ampleur du chantier…

Types de catégorisations opérationnelles

- **Masse au décollage :** seuils 2 kg, 4 kg, 8 kg, 20 kg, 25 kg, 150 kg, 600 kg (selon les cas et les règlements)

On notera que la masse est de moins en moins considérée comme un facteur isolé, pour les drones de taille petite et moyenne, sachant que les conséquences d'une chute ou d'une collision font intervenir non la masse seule, mais l'énergie. Dans ce contexte, il paraît probable que la réglementation EASA soit étendue à terme à la gamme complète des masses de drones.

- **Mode opératoire :**

. VLL : Very Low level operations, alias non-standard VFR (Visual flight rules) or IFR (Instrument flight rules) operations, below typical IFR and VFR altitudes for manned aviation, i.e. not to exceed 500 ft above ground level; they comprise:

. VLOS : Visual Line-Of-Sight (operation in a range typically not greater than 500 m, in which the remote pilot maintains direct unaided visual contact with the remotely piloted aircraft)

. EVLOS : Extended Visual Line-of-Sight operation (where, beyond 500 m, the pilot is supported by one or more observers, and in which the crew maintains direct unaided visual contact with the remotely piloted aircraft)

. BVLOS : Beyond Visual Line-of-Sight operation, below 500 ft, hence requiring additional technological support

. IFR / VFR : operations above 500 ft and above minimum flight altitudes

. RLOS : Radio Line-of-Sight operation (direct electronic point-to-point contact between transmitter and receiver; in non-segregated airspace where manned aviation is present, key capability is "detect and avoid" in relation to cooperative and non-cooperative nearby traffic, otherwise specific procedures and restrictions would apply)

. BRLOS : Beyond Radio Line-of-Sight operation (requires wider range communication services, including via satellite).

- **Structure de l'Espace aérien : ségrégué** (aux dimensions spécifiées, alloué à l'usage exclusif d'utilisateurs spécifiés) **ou non-ségrégué.**

- **Hauteur de vol :** seuils 0 m, 30m, 50m, 60m, 100m, 150m, 400 ft ou 500 ft, selon les règlements et les cas.

- **Distance de sécurité :** seuils de 50m, 100m, 150m ou 200 m, selon les règlements et les cas.

- **Distance par rapport à un axe de piste** : seuils de 0,5 km, 1 km, 2,5 km, 3,5 km, 5 km, 8 km, 10 km, selon les règlements et les cas.

- **Rayon de la zone d'exclusion pour protéger les tiers** : réf. arrêté français du 17/12/2015 mentionné ci-dessous relatif à la conception et à l'emploi des RPAS.

Rayon R de la zone minimale d'exclusion des tiers : $R = V * \sqrt{\frac{2H}{g}}$ (en m)

g = 9,81 m/s^2
V = vitesse horizontale par rapport au sol (m/s)
H = hauteur par rapport au sol (m)
R ne peut être inférieur à 10 m
R peut être borné à 30 m pour les aéronefs de masse ≤ 4 kg.

- **Utilisation de l'espace aérien : réf. arrêté français du 17/12/2015** ***(Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie)*** *relatif à l'utilisation de l'espace aérien par les aéronefs qui circulent sans personne à bord* ***(abrogeant l'arrêté du 11/04/2012)***

Cet arrêté fixe les dispositions en termes de zones interdites, de vol au voisinage d'infrastructures de décollage/atterrissage, les accords préalables requis, en fonction des hauteurs et des distances concernées, selon les conditions (en vue, hors vue, de nuit) et les périodes considérées (jours de semaine), les dérogations particulières.

- **Densité de trafic / zone survolée / densité de population**

- **Conditions météo**

- **Gestion du trafic (ATM) : espace aérien contrôlé** ou **non-contrôlé.**

- **Scénarios de l'arrêté français du 17/12/2015[151] 2015** ***(Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie)*** *relatif à la conception des aéronefs civils qui circulent sans personne à bord, aux conditions de leur emploi et aux conditions de leur emploi et aux capacités requises des personnes qui les utilisent* **(abrogeant l'arrêté du 11/04/2012)**

  - S-1 : *utilisation hors zone peuplée, sans survol de tiers, en vue et à une distance horizontale maximale de 200 mètres du télépilote ;*

  - S-2 : *utilisation hors zone peuplée, sans tiers au sol dans la zone d'évolution, ne répondant pas aux critères du scénario S-1, à une distance horizontale maximale d'un kilomètre du télépilote ;*

  - S-3 : *utilisation en zone peuplée, sans survol de tiers, en vue et à une distance horizontale maximale de 100 mètres du télépilote ;*

  - S-4 : *utilisation hors zone peuplée ne répondant pas aux critères des scénarios S-1 et S-2.*

Dans le cadre du scénario S-4 et par dérogation à la définition des termes « zone peuplée », contenue dans l'article 2 du présent arrêté, l'aéronef n'est pas considéré comme évoluant en zone peuplée si la distance horizontale qui le sépare de tout rassemblement de personnes est supérieure à 50 mètres.*

**Zone peuplée : un aéronef est dit évoluer en « zone peuplée » lorsqu'il évolue : – au sein ou à une distance horizontale inférieure à 50 mètres d'une agglomération figurant sur les cartes aéronautiques en vigueur diffusées par le service d'information aéronautique à l'échelle 1/500000 ou, à défaut, à l'échelle 1/250000, ou ; – à une distance horizontale inférieure à 150 mètres d'un rassemblement de personnes, sauf précision contraire au sein du présent arrêté.*

- **Catégories de l'arrêté français du 24/12/2013** *fixant les règles relatives à la conception et aux conditions d'utilisation des aéronefs militaires et des aéronefs appartenant à l'Etat et utilisés par les services de douanes, de sécurité publique et de sécurité civile qui circulent sans aucune personne à bord :*

  - Catégorie M-0 : *aéronefs captifs de masse maximale au décollage inférieure à 25 kilogrammes.*

  - Catégorie M-I : *aéronefs de masse maximale au décollage inférieure à 2 kilogrammes.*

  - Catégorie M-II : *aéronefs de masse maximale au décollage comprise entre 2 et 25 kilogrammes et qui évoluent selon un mode de vol sous contrôle manuel.*

  - Catégorie M-III : *tout aéronef de masse maximale au décollage supérieure à 2 kg et inférieure à 150 kilogrammes et ne respectant pas les caractéristiques des catégories M-0 et M-II.*

  - Catégorie M-IV : *tout aéronef de masse maximale au décollage égale ou supérieure à 150 kilogrammes.*

Catégorisations fonctionnelles

- **Classe de moyens techniques de pilotage :**
  - C2 : Command and control
  - C3: Command, control and communications
  - C4: Command, control, communications and computing
- **Niveaux d'autonomie :** *à définir*

[151] Cet arrêté stipule et précise de nombreuses conditions et limitations relatives en particulier aux opérations, à la sécurité et aux dispositifs exigés, aux documents et attestations requis, à la navigabilité et à son maintien, à l'identification, à l'exploitation, à la protection des tiers au sol et au niveau de compétence des télépilotes. L'arrêté couvre en outre l'aéromodélisme et les expérimentations

Catégorisation des modes de pannes *FUNCTIONAL FAILURE CLASSIFICATION LEVELS* (Extraits de **EUROCAE ER-010 – Juillet 2013**)

- ***Class I:*** *Failure condition that is expected to directly or indirectly lead to physical hit of third parties in the air or on the ground (see notes below)*
- ***Class II:*** *Failure Condition that is not expected to lead to physical hit of third parties in the air or on the ground but is expected to lead to stress to third parties in the air or on the ground as a result of nearby collision or crash nearby third parties.*
- ***Class III:*** *Failure Condition that is not expected to lead to physical hit of third parties in the air or on the ground nor to stress to third parties in the air or on the ground but is expected to lead to a significant increase in workload to UAS crew, to ATC.*
- ***Class IV:*** *Failure Condition that is not expected to lead to physical hit of third parties in the air or on the ground nor to stress to third parties in the air or on the ground but is expected to lead to a slight increase in workload to UAS crew or ATC*
- ***Class V:*** *Failure Condition that is not expected to lead to physical hit of nor stress to third parties in the air or on the ground and will not increase the workload to UAS crew or ATC.*

Echelles de sévérité des pannes *APPENDIX 3 : ONGOING SEVERITY DEFINITIONS* (Extraits de **EUROCAE ER-010 – Juillet 2013**)

- Catastrophic

- *EASA A-NPA 16/2005 ("Severity I"): The worst UAV hazard event designated hereafter as "Catastrophic" or Severity I Event may be defined as the UAVs inability to continue controlled flight and reach any predefined landing site, i.e.an UAV uncontrolled flight followed by an uncontrolled crash, potentially leading to fatalities or severe damage on the ground.*
- *NATO STANAG 46 71 AMC 1 309: Failure conditions that result in a worst credible outcome of at least uncontrolled flight (including flight outside of pre-planned or contingency flight profiles/areas) and/or uncontrolled crash (which can potentially result in a fatality).*
- *JARUS (draft June 2013 as circulated for National Authorities comments): Failure conditions which could result in one or more fatalities.*

- Hazardous

- *EASA A-NPA 16/2005 ("Severity II"): Failure conditions leading to the controlled loss of the UAV over an unpopulated emergency site, using Emergency Recovery procedures where required.*
- *NATO STANAG 467 1 AMC 1309: Failure conditions that either by themselves or in conjunction with i ncreased crew workload, are expected to result in a controlled-trajectory termination or forced landing potentially l eading to the loss of the UAV where it can be reasonably expected that a fatality will not occur.*
- *JARUS (draft June 2013 as circulated for National Authorities comments) : Failure conditions that would reduce the capability of the UA or the ability of the remote crew to cope with adverse operating conditions to the extent that there would be the following:*
- *A controlled-trajectory termination of flight potentially leading to the loss of the UA where it can be reasonably expected that a fatality will not occur or*
- *A large reduction in safety margins or functional capabilities or*
- *Loss of Detect and Avoid (UA unable to maintain safe separation)*

Major

- *EASA A-NPA 16/2005 ("Severity III ") : Failure conditions leading to significant reduction in safety margins (e.g., total loss of communication with autonomous flight and landing on a predefined emergency site).*

- *NATO STANAG 467 1 AMC 130 9 : Failure conditions that either by themselv es or in conjunction with increased crew workload, are expected to result in an emergency landing of the UAV on a predefined site where it can be reasonably expected that a serious injury will not occur.*
- *JARUS (draft June 2013 as circulated for National Authorities comments) : Failure conditions that would reduce the capability of the UA or the ability of th e remote crew to cope with adverse operating conditions to the extent that there would be a significant reduction in safety margins, functional capabilities or separation assurance. In addition, the failure condition has a significant increase in remote crew workload or in conditions impairing remote crew efficiency.*

Minor

- *EASA A-NPA 16/2005 ("Severity IV "): Failure conditions leading to slight reduction in safety margins (e.g. loss of redundancy).*
- *NATO STANAG 46 71 AMC 1 309 : Failure conditions that do not significantly reduce UAV System safety and involve UAV crew actions that are well within their capabilities. These conditions may include a slight reductio n in safety margins or functional capabilities, and a slight increase in UAV crew workload.*
- *JARUS (draft June 2 013 as circulated for National Authorities comments): Failure conditions that would not significantly reduce UA safety and involve remot e crew actions that are within their capabilities. Minor failure conditions may include a slight reduction in safety margins or functional capabilities, a slight increase in remote crew workload, such as routine flight plan changes.*

No Safety Effect

- *EASA A-NPA 16/2005 (Severity V"): Failure conditions leading to no Safety Effect.*
- *NATO STANAG 4671 AMC 1 309: Failure conditions that have no effect on safety.*
- *JARUS (draft June 201 3 as circulated for National Authorities comments): Failure conditions that would have no effect on safety for example, failure conditions that would not affect the operational capability of the UA or increase remote crew workload.*

Généralités sur les probabilités acceptables et analyses de sécurité

Les classes de sévérité et de probabilité de pannes applicables aux drones, dans les considérations initiales qui leur ont été consacrées, sont rappelées dans le tableau ci-après.

	Severity	Catastrophic	Major	Minor	Insignificant
Probability level		Mode resulting in the loss of one or more human lives	Crash / forced landing with no loss of human life	Slight reduction in safety margins	Airworthiness not affected
Frequent	$> 10^{-2}$/h				
Probable	$< 10^{-2}$/h				
Remote	$< 10^{-3}$/h				
Ext. remote	$< 10^{-5}$/h				
Ext. improbable	$< 10^{-6}$/h				

	Unacceptable
	Acceptable

Ceci est à comparer aux classes de probabilité utilisées pour les avions civils (cf. tableau ci-après).

	Probability of Occurrence Definitions				
	Extremely improbable	Extremely remote	Remote	Reasonably probable	Frequent
Qualitative definition	Should virtually never occur in the whole fleet life.	Unlikely to occur when considering several systems of the same type, but nevertheless has to be considered as being possible.	Unlikely to occur during the total operational life of each system but may occur several times when considering several systems of the same type.	May occur once during total operational life of one system.	May occur once or several times during operational life.
Quantitative definition	$< 10^{-9}$ per flight hour	10^{-7} to 10^{-9} per flight hour	10^{-5} to 10^{-7} per flight hour	10^{-3} to 10^{-5} per flight hour	1 to 10^{-3} per flight hour

- Probabilité de perte avion pour des combinaisons de pannes multiples, par heure de vol :

- 10^{-7} (avions de grande taille - CS25)
- 5.10^{-5} (avions monomoteur légers < 6000 lbs, moteur à pistons - CS23)

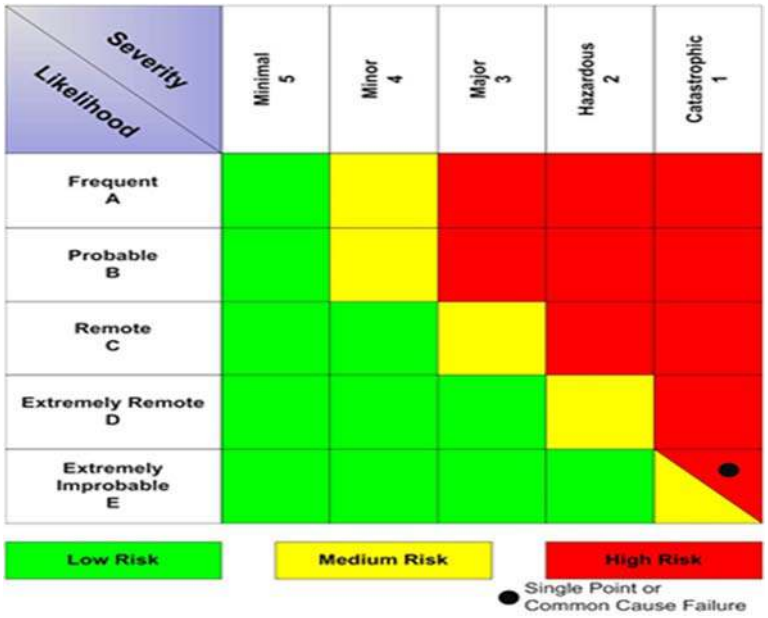
- Probabilité de panne système pouvant conduire à un événement catastrophique, par h de vol :

- 10^{-9} (avions de transport civil et d'affaires - CS25), basé sur 100 combinaisons estimées de pannes techniques aux conséquences catastrophiques (facteur 100 conservatif pour petits avions ou drones)
- 10^{-7} (avions militaires de combat - CS23)

L'extrait de la NPA 16-2005 ci-après rappelle les probabilités associées à différents types d'aéronefs.

AIRCRAFT TYPE		Catastrofic failure	Aircraft loss	
			Technical	Statistics
Military	Combat aircraft	1E-07	1E-05	**5E-05**
CS- 25	Transport a/c, business jets	**1E-09**	1E-07	**3E-07**
CS- 23	Commuters	1E-09	1E-07	**1E-06**
	M > 6000 lbs reciprocating	1E-08	1E-06	**5E-06**
	M < 6000 lbs turbine	1E-07	1E-06	**1E-05**
	M < 6000 lbs reciprocating	**1E-06**	5E-06	**2E-05**

Le principe de proportionnalité qu'EASA/JARUS visent d'intégrer dans la réglementation applicable aux drones se traduit par le tableau suivant :



Catégorisation « pré-réglementaire »

Ce principe est à la base de la classification des drones en 3 catégories telle que l'EASA la prévoit (cf. note sur le concept relatif aux opérations des drones du 12/03/2015), et résumée dans le tableau suivant :

Il va de soi que les drones commerciaux de transport tomberaient automatiquement dans la catégorie C réglementée / certifiée, la plus exigeante.

Catégorie	Catégorie A : « open category »	Catégorie B « specific category »	Catégorie C : « regulated category »
Niveau de risque	Très faible. Risque réduit pour les personnes au sol (faible énergie cinétique et distances minimales à respecter)	Intermédiaire, à réduire par limitations opérationnelles et/ou équipements spéciaux, et/ou personnel spécialement qualifié	Niveau fonction de l'énergie cinétique, du type et de la complexité des opérations, du degré d'autonomie
Conditions d'opération	Opérations simples < 500 ft AGL, en ligne de vue télépilote (jusqu'à 500m), en dehors des zones réservées (zones aéroports, protection sécurité / environnement). Limite de masse max envisagée pour opérations en ville et au-dessus de zones habitées, mais vol interdit au-dessus des foules.	Analyse de sécurité prenant en compte masse, vitesse, classe d'espace aérien, présence de population et complexité opérationnelle de la mission, dont les règles suivies (VFR/IFR). Opérations proches de foules autorisées sous réserve de fonctionnalités supplémentaires / procédures en cas de perte de liaison de données / dispositifs limiteurs d'énergie d'impact / procédures opérationnelles	En général, vol en BVLOS* - drones de grande taille et complexité - Liaisons Command-Control (C2) dans une bande aéronautique protégée
Exigences spécifiques	Cadre réglementaire minimal, sans approbation des autorités de l'aviation, pour la navigabilité / les opérateurs et sans licence / formation obligatoire des opérateurs et télépilotes. Les normes de l'industrie s'appliquent, et les opérations sont sous la surveillance de la police « traditionnelle »	- *Limite ouverte à ce stade entre les catégories B et C, en fonction notamment des conditions ci-dessus* - Autorisation d'opération délivrée par l'autorité nationale + éventuellement : par organisme accrédité /entités qualifiées pour les tâches techniques	Apparentées au processus réglementaire applicable aux avions pilotés à bord, avec notamment : Certificat de type + certificats de navigabilité et de bruit individuels Conditions de certification (CS) envisagées pour stations sol, liaisons C2 et fonctions « D&A »

* Beyond Visual Line of Sight

On retrouve ces trois categories opérationnelles dans la proposition n°1 du document « Technical Opinion - Introduction of a regulatory framework for the operation of unmanned aircraft» publié par EASA le 18/12/2015, qui est le résultat de la consultation A-NPA:2015-10, dont le contenu est reproduit ci-dessous :

Proposal 1:
Establish three categories for the operation of unmanned aircraft taking into account the nature and risk of the particular activity.
- 'Open' category (low risk): Safety is ensured through compliance with operational limitations, mass limitations as a proxy of energy, product safety requirements and a minimum set of operational rules.
- 'Specific' category (medium risk): Authorisation by an NAA, possibly assisted by a QE, following a risk assessment performed by the operator. A manual of operations lists the risk mitigation measures.
- 'Certified' category (higher risk): Requirements comparable to those for manned aviation. Oversight by NAA (issue of licences and approval of maintenance, operations, training, ATM/ANS and aerodromes organisations) and by the Agency (design and approval of foreign organisations).

Des sous-catégories de la catégorie « Open » seront établies par EASA (sur la base d'études d'impact exhaustives) pour adapter la réglementation au niveau de risque : exigences techniques (ex. redondances), distance minimale des personnes non impliquées, limitation d'accès aux zones d'opérations.

Une sous-catégorie de la catégorie « Open », la catégorie : « harmless » (inoffensive), est envisagée par EASA, pour les très petits drones (jouets par exemple), qui seraient soumis essentiellement aux règles commerciales et à des règlements locaux.

Méthodes complémentaires / alternatives d'analyse des risques

- ***Energie cinétique à l'impact***

Méthode reposant sur l'hypothèse que le potentiel de préjudice causé à un tiers est grossièrement proportionnel à l'énergie du véhicule à l'impact.
Deux causes présumées : tentative d'atterrissage en secours sous contrôle, ou perte totale de contrôle ➔ calcul d'énergie cinétique pour chaque scénario ➔ détermination du code réglementaire applicable (CS : Certification Specifications).

- ***Notion de surface létale et approche probabilistique***

Formule inspirée de l'approche de la NPA 16-2005 :

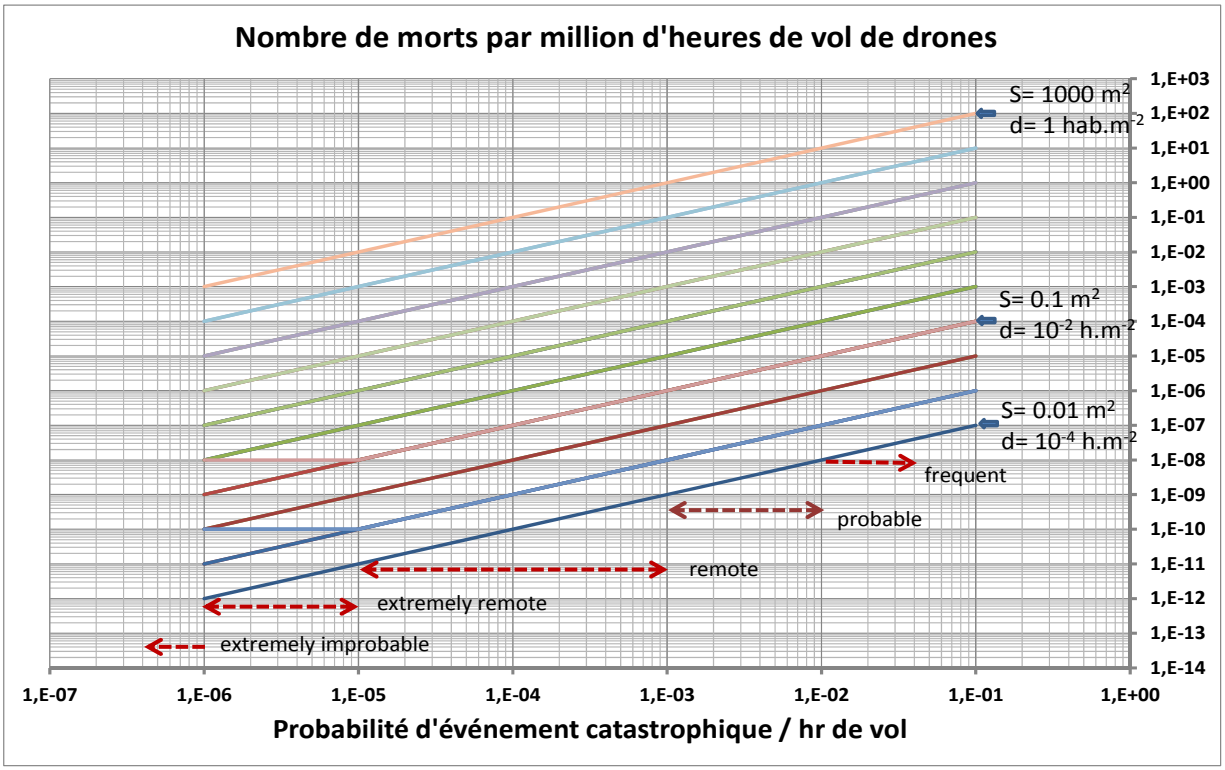
$N = S_L * d * p$

N= nombre de victimes par million d'heures de vol
S_L = surface létale (m^2) , elle-même calculée à partir de l'énergie cinétique
d = densité de la population exposée (hab/km^2)
p = probabilité d'événement catastrophique par heure de vol
où les paramètres techniques S_L et p sont définis par le constructeur, le paramètre opérationnel d par l'utilisateur et l'objectif N par l'autorité responsable.

Critère de tolérance suggéré par la NPA 16-2005 **: 1 victime / 10^6 heures de vol de drone** (basé sur divers éléments, dont les statistiques concernant les avions militaires).
On peut à partir de la formule ci-dessus construire le tableau suivant donnant le nombre de morts par million d'heures de vol en fonction du niveau de densité de population et de la surface létale du drone et de la probabilité d'événement catastrophique.

Nombre de morts par million d'heures de vol								
			Probabilité évènt. catastroph./ hr vol					
Densité de population	d	S drone (m^2)	1,E-06	1,E-05	1,E-04	1,E-03	1,E-02	1,E-01
Campagne-champ	1,E-04	1,E-02	1,E-12	1,E-11	1,E-10	1,E-09	1,E-08	1,E-07
	1,E-04	1,E-01	1,E-11	1,E-10	1,E-09	1,E-08	1,E-07	1,E-06
	1,E-04	1,E+00	1,E-10	1,E-09	1,E-08	1,E-07	1,E-06	1,E-05
	1,E-04	1,E+01	1,E-09	1,E-08	1,E-07	1,E-06	1,E-05	1,E-04
	1,E-04	1,E+02	1,E-08	1,E-07	1,E-06	1,E-05	1,E-04	1,E-03
	1,E-04	1,E+03	1,E-07	1,E-06	1,E-05	1,E-04	1,E-03	1,E-02
Rue peu passante	1,E-03	1,E-02	1,E-11	1,E-10	1,E-09	1,E-08	1,E-07	1,E-06
	1,E-03	1,E-01	1,E-10	1,E-09	1,E-08	1,E-07	1,E-06	1,E-05
	1,E-03	1,E+00	1,E-09	1,E-08	1,E-07	1,E-06	1,E-05	1,E-04
	1,E-03	1,E+01	1,E-08	1,E-07	1,E-06	1,E-05	1,E-04	1,E-03
	1,E-03	1,E+02	1,E-07	1,E-06	1,E-05	1,E-04	1,E-03	1,E-02
	1,E-03	1,E+03	1,E-06	1,E-05	1,E-04	1,E-03	1,E-02	1,E-01
Pelouse de stade de foot-plage	1,E-02	1,E-02	1,E-10	1,E-10	1,E-09	1,E-08	1,E-07	1,E-06
	1,E-02	1,E-01	1,E-09	1,E-08	1,E-07	1,E-06	1,E-05	1,E-04
	1,E-02	1,E+00	1,E-08	1,E-07	1,E-06	1,E-05	1,E-04	1,E-03
	1,E-02	1,E+01	1,E-07	1,E-06	1,E-05	1,E-04	1,E-03	1,E-02
	1,E-02	1,E+02	1,E-06	1,E-05	1,E-04	1,E-03	1,E-02	1,E-01
	1,E-02	1,E+03	1,E-05	1,E-04	1,E-03	1,E-02	1,E-01	1,E+00
Rue très passante	1,E-01	1,E-02	1,E-09	1,E-09	1,E-08	1,E-07	1,E-06	1,E-05
	1,E-01	1,E-01	1,E-08	1,E-07	1,E-06	1,E-05	1,E-04	1,E-03
	1,E-01	1,E+00	1,E-07	1,E-06	1,E-05	1,E-04	1,E-03	1,E-02
	1,E-01	1,E+01	1,E-06	1,E-05	1,E-04	1,E-03	1,E-02	1,E-01
	1,E-01	1,E+02	1,E-05	1,E-04	1,E-03	1,E-02	1,E-01	1,E+00
	1,E-01	1,E+03	1,E-04	1,E-03	1,E-02	1,E-01	1,E+00	1,E+01
Tribune-Stade	1,E+00	1,E-02	1,E-08	1,E-08	1,E-07	1,E-06	1,E-05	1,E-04
	1,E+00	1,E-01	1,E-07	1,E-06	1,E-05	1,E-04	1,E-03	1,E-02
	1,E+00	1,E+00	1,E-06	1,E-05	1,E-04	1,E-03	1,E-02	1,E-01
	1,E+00	1,E+01	1,E-05	1,E-04	1,E-03	1,E-02	1,E-01	1,E+00
	1,E+00	1,E+02	1,E-04	1,E-03	1,E-02	1,E-01	1,E+00	1,E+01
	1,E+00	1,E+03	1,E-03	1,E-02	1,E-01	1,E+00	1,E+01	1,E+02

Ce tableau peut être transformé sous forme graphique dans le diagramme ci-dessous.



- ***Objectifs de sécurité des drones***

Les critères initiaux sont orientés vers la protection des personnes au sol, avec une correspondance à établir entre les catégories de drones et les règlements CS23-CS25.
Un retour est à prévoir vers les CS23-CS25 si les drones futurs doivent transporter des personnes.
Dans une telle perspective, il y aura lieu de réexaminer les concepts de gestion des risques et l'ensemble des méthodes, critères et analyses de sécurité, en intégrant les multiples interfaces et facteurs impliqués : drones, pilotes et stations impliqués au sol, gestion du trafic aérien, signalisations automatiques, communications entre drones, pilotes, stations sol, satellites, contrôleurs du trafic aérien (robotisés ou humains), organismes météorologiques et autres aéronefs, etc.

La prise en compte d'avions pilotés avec un seul pilote à bord assisté d'un (ou plusieurs) pilote(s) au sol pourrait/ devrait faire partie de ce réexamen approfondi, incluant les différentes configurations de trafic et interfaces mixtes.

- ***Conséquences d'une collision entre drone de petite taille/masse et un aéronef habité***

Dans une étude globale et succincte commanditée par UAS America Fund, un cabinet de consultant US (Exponent) évalue le risque d'impacts de mini-drones (masse ≤ 3 lbs) en comparant les chocs à ceux d'oiseaux de taille petite ou moyenne, sur la base des masses et des énergies cinétiques en jeu. L'étude se réfère à une base de données FAA sur les impacts d'oiseaux rapportés aux USA, à la fois civils et militaires, portant sur plus de 150000 collisions, entre 1990 et 2014, dont 90% concernaient des oiseaux de taille petite ou moyenne, dont 9% ont provoqué des dommages à l'avion, et dont 0.15% ont fait des victimes : blessés ou morts. L'étude filtre les nombres d'événements rapportés dans la base de données sur la base des conditions « normales » d'utilisation des drones, notamment : altitude ≤ 400 ft et seuils de distance de l'aéroport ≥ 3 ou 5 miles. Compte tenu du nombre de cas très faible restant après filtrage (37 cas, 3 morts), et par ailleurs du nombre d'oiseaux aux US (10 milliards) et des gammes de vitesse d'impact très étendues pour les oiseaux comme pour les drones, l'étude conclut que les drones de masse ≤ 3 lbs ne causeront pas une augmentation significative du risque pour les avions habités. Au-delà de cette étude a priori « rassurante », un certain nombre de questions restent cependant à approfondir,

concernant la capacité d'endommagement qu'un drone ou un groupe de drones peut faire subir à un aéronef lors d'une collision, comparativement à un oiseau ou un groupe d'oiseaux, en examinant l'aspect choc avec la cellule et l'aspect choc avec un moteur (prenant en compte l'énergie cinétique importante des aubes à l'impact). Il faut aussi envisager le cas de drones dont la masse est supérieure à celle de la catégorie des gros oiseaux. Il est évident que lorsque le drone devient d'une taille comparable à celle d'un avion habité, le risque en cas de collision se rapproche de celui d'une collision entre avions. En outre, le facteur probabilité d'évènement devrait être pris en compte, en particulier les différences entre les comportements d'oiseaux et les performances des drones plus ou moins équipés, en matière de détection et évitement, ainsi que les conditions opérationnelles / restrictions applicables aux drones.

Autres aspects règlementaires

- Liens à faire avec tous les aspects relatifs à l'intégration dans l'espace aérien non ségrégué, y compris avec les activités de recherche et expérimentations associées (SESAR, European Defence Agency,…): développement par l'OACI des ASBU (Aviation Dystem Block Upgrades), D&A[152], accès espace aérien / aéroport, liaisons command-control (C2), vols en formation ou coordonnés, transferts de contrôle d'une station sol à une autre, traitement des urgences, facteurs humains, interface homme-machine, sécurité, sûreté, autonomie, etc.)
- Normes de performances minimales pour navigation, communication et surveillance
- Adaptation des infrastructures
- Nouvelles procédures opérationnelles
- Formation et entraînement adaptés
- Systèmes D&A à réglementer spécifiquement (par une organisation responsable ATM ?)
- Le **retour d'expérience**, crucial pour les drones civils compte tenu de la disparité des caractéristiques, des missions et des modes opératoires, doit être défini, organisé et encadré par la réglementation avec toute la rigueur et le niveau de précision nécessaires.

Partage des responsabilités réglementaires

- MTOW < 150 kg : Etats membres
- MTOW ≥ 150 kg : EASA

Ce partage est fortement susceptible d'évoluer, avec une implication de l'EASA non limitée par cette masse, compte tenu des critères en discussion, favorisant l'énergie

- EUROCAE WG73 : préparation de bases règlementaires européennes harmonisées
- JARUS : développement de règlements européens harmonisés
- OACI : développement d'une réglementation internationale harmonisée

Aspects sûreté et protection de la vie privée

Les aspects protection des données et de la vie privée inhérents aux opérations de drones constituent une préoccupation majeure et doivent être impérativement couverts, dans certains cas de façon conjointe avec les aspects sécurité, et sous la responsabilité des autorités locales et nationales. On évoque le concept de **gestion intégrée des différents types de risques**.

Parmi les divers moyens à l'étude, on peut citer l'enregistrement spontané des opérateurs dans une application sur internet maintenue par les autorités locales, la signature d'un registre associé à certaines conditions, un portail d'informations sur internet contenant les règlements locaux et restrictions temporaires, l'utilisation de systèmes à puces électroniques / cartes Sim, etc.

[152] D&A: Detect and Avoid

Une couverture d'assurance responsabilité au tiers est nécessaire quelle que soit la catégorie d'opération, comme pour les aéro-modèles. A noter qu'une telle assurance n'est requise pour ces derniers qu'à partir de 20kg (règlement EC n° 785/2004).

Spectre de fréquence

La disponibilité d'un spectre de fréquence attribué spécifiquement aux opérations des drones est une condition indispensable de leur développement. Ce sujet se traite au niveau international au sein de l'UIT (Union Internationale des Télécommunications ou ITU : International Telecommunication Union), avec une coordination entre membres européens via le groupe consultatif ASFCG (European Aeronautical Spectrum Frequency Consultation Group).

L'OACI est indirectement impliquée aussi sur cette question.

Evolution des exigences

Des changements d'exigences prévisibles sont en gestation (déjà évoqués), en termes de clauses, critères, niveaux, structure (classifications / catégorisations / combinaisons avec conditions opérationnelles diverses), entre « petits » drones actuels sans personne à bord et des drones futurs éventuels transportant des personnes, auxquels s'appliqueront des règlements communs pour l'essentiel avec ceux concernant les autres avions. Tous les règlements devront dans tous les cas être régulièrement revus, adaptés et réaménagés, et on peut prévoir des évolutions importantes au cours des prochaines années/décennies, avec un niveau d'exigence croissant.

Remarque sur la difficulté du contexte réglementaire

Parmi les principes de base retenus par L'EASA pour élaborer la réglementation des drones, figurent : une réglementation proportionnelle, basée sur le contexte opérationnel, basée sur le niveau de risque, basée sur la performance (associant objectifs et processus, avec différents niveaux des exigences de base aux spécifications et au « guidance material », en passant par les moyens de conformité), progressive et la moins « perturbante » possible (les drones étant souvent perçus comme des intrus dans l système de l'aviation).

Cette approche sensée, qui est sans doute celle de l'ensemble des organismes chargés de la réglementation des drones dans le monde, implique beaucoup d'efforts pour mener à bien des tâches difficiles, compte tenu notamment des facteurs suivants :

- complexité et de la multiplication des cas et des catégories, liés aux caractéristiques et opérations très diverses des drones
- interactions à prendre en compte entre drones et autres aéronefs
- besoin de préserver la cohérence globale de l'ensemble de la réglementation, y compris les spécifications opérationnelles en interaction avec les aspects ATC (Eurocontrol)
- nombreux critères nouveaux à prendre en compte et affiner dans des analyses de sécurité elles-mêmes plus complexes,
- domaines supplémentaires nécessitant une extension spécifique de la réglementation (stations-sol, systèmes D&A, et de limitations géographiques),
- problématiques nouvelles ou à réexaminer dans des perspectives nouvelles (sûreté, cybersécurité) .

Cette difficulté au niveau du volume et de la complexité des tâches se double d'un enjeu de temps, avec la difficulté d'avoir à faire face à un besoin urgent de réglementation lié à la multiplication des drones dans l'espace aérien.

Annexe 5 : Extrait de la feuille de route européenne (juin 2013)

Complément à Annexe 4

EUROPEAN REGULATORY ROADMAP FOR RPAS Planned actions for ASBU 1 *(ICAO Aviation System Block Upgrade 1)*							
Regulatory Improvement (RI)				**Enablers**			
N	**Identification**	**Description**	**Target date**	**No.**	**Deliverables**	**Resp.**	**Target Date**
13[153]	Civil/military safety objectives for airworthiness	Manufacturing industry can produce platforms for 'dual-use' (i.e. civil or military, depending on the customer). But to do so harmonised safety objectives (or targets; e.g. 1309) are necessary.	2014/7	13A	Draft RPAS safety objectives for airworthiness (RPA of any weight)	JARUS	2013 Q1
				13B	WG 73 Report on alternative approaches on UAS safety objectives for airworthiness of RPA > 150 Kg and subsequent recommendations	Eurocae	Mid 2013
				13C	WG 93 Report on UAS safety objectives for airworthiness of RPA < 150 Kg	Eurocae	2014
				13D	Decision on AMC for civil UAS safety objectives for airworthiness of RPA > 150 Kg	EASA	2015
				13E	Harmonised European civil/military UAS safety objectives for airworthiness	EDA	2016
				13F	Revision of AMC for civil UAS safety objectives for airworthiness (based on the Recommendation for European civil/military harmonisation)	EASA	2017

The sequence of activities is presented in the table below:

WBS RI 13					
2013		2014	2015	2016	2017
Draft RPAS Safety objectives for airworthiness (RPA of any weight) (13A)	WG 73 Report on Alternative approaches on UAS safety objectives for airworthiness of RPA > 150 Kg (13B)	WG 93 Report on UAS safety objectives for airworthiness of RPA < 150 Kg (13C)	Decision on AMC for civil UAS safety objectives for airworthiness of RPA > 150 Kg (13D)	Harmonised European civil-military UAS safety objectives for airworthiness (13E)	Revision of AMC for civil UAS Safety objectives for airworthiness (based on the recommendation for European civil/military harmonisation) (13F)

[153] RI 13 aiming at harmonised civil/military safety objectives for airworthiness (i.e. to mitigate the risk to persons on the ground) which would enable manufacturing industry to develop platforms potentially purchased by either civil or military customers (damage to equipment, including the RPA, or to third party property is not considered a safety risk, but only an economic risk which can be mitigated through insurance)

Annexe 6 : Réflexions complémentaires sur les Tendances, Finalités et Objectifs dans le développement des Drones

Tendances, finalités et objectifs principaux

Tendances marquées dans la perspective future

- Les drones ont un potentiel considérable
- Ils sont/vont être de plus en plus utilisés et, comme les autres aéronefs, et ils incorporeront des technologies de plus en plus sophistiquées
- Le nombre et la variété des acteurs croissent très rapidement (>1500 aujourd'hui)
- Le trafic aérien va être de plus en plus dense et varié
- Les interconnexions entre sol, air et espace vont se multiplier
- De nouvelles problématiques (combinées à celles existantes) et besoins nouveaux ne cessent d'apparaître

Finalités / objectifs de premier ordre (quasi- buts ultimes)

- Faciliter le développement harmonieux des drones, intégrés dans un trafic aérien fluide, sûr, dans des conditions viables et optimales (avec des implications concernant la sécurité-sûreté, la gestion du trafic, l'économie, l'industrie, la recherche,…)
- Les faire contribuer de façon durable à l'essor de l'aviation, du transport aérien, de l'industrie aéronautique, des vocations et des métiers associés, aux niveaux français, européen et mondial

Objectifs intermédiaires (correspondant aux besoins fondamentaux)

- Créer un cadre législatif, réglementaire et de formation adaptée, efficace

Objectifs dérivés (liés à la question des moyens techniques et opérationnels indispensables)

- Parmi les plus importants : il faut utiliser au mieux les fonctions automatiques, les interconnexions et la ségrégation de l'espace aérien, pour satisfaire les objectifs de premier ordre.

Comment interpréter et prendre en compte les tendances

- Recenser les principaux besoins et potentialités liés à l'utilisation des drones, en matière de fonctionnalité, flexibilité et versatilité

  - Pour cela : il faut resserrer le champ des analyses en distinguant des classes à partir des combinaisons de paramètres-clés : caractéristiques de taille et opérationnelles, degré d'autonomie visé ou nécessaire, d'où modes de pilotage et transition de modes, capteurs, signaux, connexions, etc.

- Stimuler et guider efficacement le développement technologique

  - Intensifier, soutenir et coordonner les programmes de Recherche, Technologie et Développement (systèmes sol, vol, espace)

  - Assurer la cohérence (en temps et en potentiel) des développements technologiques entre les différents types d'aéronefs et avec les infrastructures (sol-air-espace)

  - Faire fructifier les synergies liées à la dynamique d'expansion des drones

  - Stimuler les coopérations (nationale et internationale, incluant l'Union Européenne) aux niveaux des gouvernements, de la Recherche, et de l'Industrie.

- Prévoir, planifier et mettre en œuvre l'implantation et l'insertion dans l'espace aérien

- Examiner les besoins et possibilités de ségrégation pour essais et opérations (lieux de décollage/atterrissage, couloirs de vol autorisés)

- Examiner les besoins et possibilités de zones non ségréguées.

Comment satisfaire les objectifs de premier ordre

- Développer la législation et la réglementation dans les divers domaines touchant la sûreté et la sécurité (aéronefs et équipements à bord, infrastructures, opérations, gestion du trafic, qualification des personnels), avec un souci d'efficacité et d'harmonie

- La réglementation relative aux UAS (pilotés à distance ou dans certains cas avec la « double fonction ») devra prévoir une catégorisation appropriée, mais devra être aussi simple que possible et dans tous les cas cohérente et sans ambiguïté par rapport à celle relative aux autres aéronefs, laquelle devra être complétée et précisée comme nécessaire, avec la même exigence de simplicité, clarté et cohérence.

- Assurer les développements technologiques nécessaires et régler les questions techniques en harmonie avec la législation et la réglementation, notamment :

- fréquences radio pour les divers signaux utilisés

- capteurs adaptés (en particulier pour détecter/éviter)

- Lancer des projets ambitieux et motivants pour donner de l'élan et constituer un pôle attractif pour la Recherche, les filières scientifiques, technologiques et industrielles.

Comment satisfaire les objectifs dérivés

- Utiliser au mieux les fonctions automatiques et les interconnexions pour satisfaire les principaux objectifs

- Le choix des modes de pilotage et des automatismes pour les UAS peut difficilement être détaillé à l'avance et de façon uniforme, car il dépend de leurs utilisation / catégorie / besoins et ressources, du développement technologique des UAS et des infrastructures, des coûts des technologies, évolutifs dans le temps.

- Sous réserve d'études approfondies, on peut anticiper une tendance vers :

. des petits drones à grande autonomie (surtout en croisière), rendus le plus « transparents » possibles pour le reste du trafic aérien, sur la base des signaux échangés entre drones, ATM (lui-même en partie automatisé) et autres aéronefs

. des « gros » drones (de fret par exemple), versatiles, à triple capacité: grande autonomie, pilotage semi-automatique ou pilotage à distance, selon les circonstances: (1) type d'utilisation (certains aéronefs pouvant être à pilotage mixte selon les vols / missions), (2) phase de vol, ou mode de fonctionnement sol, infrastructures, aéroports, disponibilités instantanées, situations complexes imprévues à gérer (certains automatismes-clés pouvant faciliter le «dialogue» et la transition entre divers modes et systèmes utilisés)

- Ceci doit être affiné progressivement en coordination étroite avec les autres aspects traités dans les différents livrets.

- Utiliser la ségrégation de l'espace aérien lorsque c'est possible…

- Ceci paraît souhaitable pour tous les types de drones, pour « soulager » le trafic aérien et son contrôle, et diminuer les risques pour la sécurité. Cela est sans doute moins facile à mettre en place pour les gros drones nécessitant des pistes et des infrastructures plus importantes .

- …et permettre les opérations en espace non ségrégué là où c'est nécessaire / inévitable, dans des conditions satisfaisantes (notamment en termes de sécurité et d'efficacité).

Actions initiées ou à prévoir

- Poursuite de la réflexion sur le processus de classification des drones, leurs opérations, modes de pilotage et espaces de navigation

- Aspects industriels, économiques et organisationnels à approfondir

- « Veille pro-active » sur évolutions réglementaires et législatives, (sécurité, cybersécurité, sûreté, protection de la vie privée, assurances, …), rapports, documents, sites internet aéronautiques et sites d'associations et d'information dédiés aux UAS (principalement EU et US) ; en particulier : suivi des activités des groupes de travail dédiés aux drones : européens (JARUS), et internationaux (OACI)

- Coordination avec autres domaines (automatismes, sécurité, facteur humain, navigation, télécommunications, météo, …)

- Suivi de l'activité formation télé-pilote de petits drones DGAC-FPDC

- Echanges avec experts extérieurs
  - Réunions périodiques et discussions dédiées avec experts UAS (ex : ENAC, Dassault Aviation)
  - Suivi des questions/actions et des réunions dédiées sur la disponibilité et à l'utilisation du spectre de fréquences radio

- Visites d'acteurs : PME - Constructeurs - Opérateurs - Donneurs d'ordre - Centres de Recherche et Laboratoires- etc.

Questions-clés à suivre (non exhaustives)

- Comment sont actuellement réglementées (ou non) les opérations des drones / UAS /RPAS civils, en France, en Europe, aux USA, et ailleurs dans le Monde ?

- Quelles actions existent ou devraient être entreprises pour assurer cohérence, coordination, coopération en matière réglementaire et législative au niveau national, européen et mondial ? Selon quels principes généraux devraient être établies les réglementations à venir dans les différentes régions ? Quel est / sera le calendrier ? Quels rôles pour EASA, OACI, etc ?

- Quel impact peut-on anticiper sur les réglementations des catégories d'aéronefs existantes?

- Quelles seraient les conséquences de l'apparition d'aéronefs mixtes pilotables à bord ou à distance, d'un vol à un autre, ou pendant un vol ? (Aspects techniques, opérationnels, réglementation, facteurs humains, etc.)

- Quels impacts du développement des drones sur les activités du transport aérien et sur d'autres secteurs peut-on anticiper, en particulier au niveau économique, industriel et organisationnel ? (Incluant les effets de synergies à l'intérieur du secteur aéronautique civil, et entre domaines civil et militaire).

…

Livret 7 : L'ENVIRONNEMENT de l'AVION CONNECTÉ

Auteurs cités aux paragraphes
Coordinateur Gérard ROZENKNOP
(Membre de l'AAE)

Même si la présente étude s'est focalisée sur l'avion et sa conduite, il n'est pas possible de réfléchir à l'avion plus connecté et plus automatique sans s'interroger sur l'environnement dans lequel il évolue. En effet, c'est l'ensemble du système de transport aérien qui sera plus connecté et plus automatique.

Sans prétendre à l'exhaustivité, ce livret se penche donc sur les principaux partenaires, ou les différentes considérations, dont le rôle interfère nécessairement avec l'avion connecté. Dans certains cas, l'avion plus connecté impliquera des modifications des activités ou du rôle des partenaires ; dans d'autres cas, le partenaire imposera des limitations à l'évolution ou à la vitesse d'évolution de l'avion plus connecté ; enfin, dans quelques cas, l'évolution de l'avion et celle du partenaire vers un système plus connecté et automatique sont indissociables.

Les domaines les plus importants qui sont détaillés dans ce livret sont donc :

- Les compagnies aériennes
- La gestion de la circulation aérienne (ATM),
- Les besoins en communication,
- La Météo ;
- La formation,
- Les aspects juridiques.

LES COMPAGNIES AERIENNES

Laurent BARTHÉLÉMY (Expert invité)

Au-delà des défis techniques à relever pour que le Transport Aérien tire pleinement parti des nouvelles possibilités offertes par les progrès en matière de communication et de connectivité, il faut aussi considérer les conséquences importantes que ces évolutions vont induire sur le fonctionnement et l'organisation des Compagnies Aériennes, ainsi que sur le contenu des métiers actuels.

Sans rechercher l'exhaustivité, sont évoquées ici quelques réflexions sur :

- La question de l'exercice de l'autorité à bord
- La création de la fonction « pilote au sol »
- Le rôle du CCO et la communication opérationnelle
- La communication commerciale

La question de l'exercice de l'autorité à bord

Aujourd'hui, dans l'aviation commerciale, le Commandant de bord est dépositaire de l'autorité tant vis-à-vis du reste de l'équipage que des passagers, pendant toute la durée de la mission.

Cette position est officiellement et internationalement reconnue (OACI, Code de l'Aviation Civile en France…).

Sa mission première, indiscutable, est évidemment d'assurer la sécurité des passagers, de l'équipage, de la cargaison et de l'aéronef.

Mais au-delà de cela, le Commandant de bord se trouve, dans le cadre de sa mission, responsable d'un groupe de plusieurs dizaines ou centaines de personnes, de tous âges, toutes nationalités. Et sur un vol – en particulier long courrier – cette « gestion de groupe » peut se révéler complexe et prenante.

Par ailleurs, il représente évidemment les intérêts de la Compagnie et est porteur de son image.

Cette fonction prend tout son sens et est loin d'être secondaire lors d'incidents (retards importants, déroutements, situation de tension à bord, passager malade, passager indiscipliné…).

Tout le long du vol - et plus particulièrement lors d'événements inattendus – il doit gérer, avec son/ses co-pilotes, la communication avec les Services de la Compagnie par l'intermédiaire du Centre de Contrôle des Opérations (CCO). A ce titre, il est donc un interlocuteur essentiel pour la Compagnie.

Suite aux attentats du 11 septembre et au renforcement des procédures anti-intrusion dans le cockpit, l'équipage technique est de fait beaucoup plus isolé de la cabine passager qu'auparavant, mais il se doit de savoir à tout moment ce qui s'y passe et c'est le rôle du chef de cabine de l'informer des situations, lorsque c'est nécessaire.

Dans le cadre de cette étude, il est utile de rappeler que la conduite du vol proprement dite ne représente qu'une partie des tâches dévolues à l'équipage technique.

Dans la perspective du passage à un seul pilote à bord, il conviendra donc de bien vérifier que celui-ci aura encore la disponibilité d'esprit et de mouvement pour assurer la plénitude de sa mission. Et il s'agira de définir précisément qui (parmi l'équipage commercial ou le support au sol) pourra l'assister ou le suppléer, voire être partiellement délégataire d'une partie de ses responsabilités.

L'articulation entre ces différents acteurs devra être dans ce cas très bien documentée, d'autant que le support au sol (« pilote au sol ») aura aussi besoin d'être tenu au courant en temps réel de la situation à bord et des éventuelles mesures spécifiques prises ou à prendre.

Bien entendu, dans l'hypothèse – beaucoup plus futuriste - d'un pilotage automatique ou depuis le sol, et donc sans pilote à bord, ce besoin d'autorité ne disparaitrait pas et devrait être confié à un membre d'équipage, lequel devra asseoir son autorité sur « quelque chose », ne disposant pas de l'autorité naturelle du Commandant de Bord.

Quelles devraient être son niveau général, sa formation et son expérience ? Et quels seraient son rôle et ses occupations à bord, au cours de l'immense majorité des vols qui, heureusement, se déroulent sans histoire ?

La création de la fonction « pilote au sol »

Tous les scénarios de réduction du nombre de pilotes à bord s'accompagnent d'un renforcement du support au sol et notamment de la création d'une fonction au sol chargée d'apporter un appui technique au pilote à bord, voire une suppléance de ce pilote en cas d'incapacité ou de situation critique.

Il existe déjà une fonction Dispatch, plus ou moins développée selon les endroits du monde et les compagnies. Elle vise à mettre à disposition des pilotes, en temps réel, des informations connues du sol (évolution météo, fermeture d'aéroports, rapports de turbulence…) et à apporter un appui technique précieux à l'équipage (calcul de plans de vol, reroutings…).

- Aux Etats-Unis, cette fonction est réglementaire. Elle est tenue par des Dispatchers ayant validés une licence délivrée par la FAA et qui en font leur métier. On parle d'ailleurs de coresponsabilité entre les pilotes et le dispatcheur.
- En Europe, l'existence d'un Dispatch n'est pas imposée par les règlements, mais certaines compagnies (KLM, Air France notamment) en ont développé des formes très élaborées (excluant la notion de coresponsabilité). D'autres compagnies (British Airways, Lufthansa) sont restées en retrait, mais étudient sérieusement une évolution dans ce sens. L'EASA réfléchit également à des évolutions réglementaires dans ce domaine.

Dans les schémas envisagés, les compétences exigées pour ces « pilotes au sol » restent à définir précisément. Elles devront évidemment aller bien au-delà de celles des dispatchers actuels, puisqu'ils devront aussi posséder des compétences de pilotage et des connaissances détaillées des avions pour pouvoir éventuellement « reprendre la main » en cas de nécessité.

La création de cette nouvelle fonction va amener les compagnies et les Administrations à traiter tout un faisceau de sujets à connotation sociale : référentiel de compétences, formation, entrainement, rémunération, évolutions de carrières…

S'agissant en particulier de l'organisation à mettre en place dans les compagnies, ce qui parait le plus vraisemblable à ce stade est que – au moins au début - les opérateurs/pilotes au sol seront des personnes ayant une large expérience du métier de pilote et ayant été spécialement formés et entrainés à ces nouvelles fonctions au sol.

Dans l'immense majorité des cas, le rôle de ces pilotes au sol sera d'apporter une assistance technique au pilote en vol (traitement d'informations météorologiques, relations avec l'ATC ou le CCO, …) pour les quelques vols (5 par exemple) qu'ils auront en suivi simultanément.

Dans le cas d'une incapacité constatée d'un pilote en vol, une décision devra être prise, selon des modalités très précises (et sans doute de façon collégiale) pour confier la gestion du vol à un pilote au sol (ou un groupe de pilotes au sol) qui se consacrerait exclusivement à ce vol et en prendrait le contrôle. Ce qui est envisagé est l'activation d'un programme préenregistré de retour en sécurité sur un aéroport prédéfini. Il n'est pas prévu, à ce stade, de faire effectuer par le pilote au sol un pilotage de type drone.

S'agissant de l'évolution des métiers et de la formation : le groupe estime que le plus probable est que les pilotes au sol seront constitués de pilotes aguerris ayant reçu et validé une formation complémentaire spécifique. Ces pilotes alterneraient des périodes au sol et des périodes en vol, pour conserver leur qualification et leur expérience du vol.

Il faudra aussi gérer la période de transition, sans doute assez longue, pendant laquelle, pour un type avion donné, la population de pilote sera constituée de sous-ensembles de pilotes :

- qualifiés vol à deux,
- qualifiés vol seul à bord,
- qualifiés vol + sol

Par ailleurs, pour une flotte donnée (famille A320 par exemple), la multiplicité des destinations d'un réseau moyen-courrier conduira nécessairement à différencier les vols « pilotables seuls à bord » et les autres : un Paris-Tel Aviv ne pourra pas être traité comme un Paris-Toulouse.

Tout cela devra être bien entendu très encadré réglementairement. Les modalités de mises en œuvre pourront varier d'une compagnie à l'autre (selon la taille et le réseau notamment) et évoluer au cours du temps en fonction des retours d'expériences.

Last but not least, les négociations sociales qui devront jalonner les différentes étapes de transformation et les évolutions d'organisation correspondantes s'annoncent très ardues.

En effet, la population de pilotes (toutes compagnies confondues), rendue forcément très inquiète sur le devenir de son métier, sera évidemment tentée d'utiliser son pouvoir de pression ou de blocage - que l'on sait considérable - pour ralentir ces évolutions ou obtenir des compensations susceptibles de remettre en cause l'intérêt économique de ces évolutions.

Le rôle du CCO et la communication opérationnelle

Le Centre de Contrôle des Opérations (CCO) est le centre névralgique opérationnel de coordination et de contrôle du programme de vols d'une Compagnie. Si sa forme, sa taille et son organisation peuvent différer d'une compagnie à une autre, son existence fait partie des obligations réglementaires.

Par délégation du Directeur Général, il veille 24 heures sur 24 à la réalisation du programme, prenant toutes décisions pour garantir la sécurité, la performance opérationnelle, la qualité de la relation Client et la défense des intérêts économiques. Il est particulièrement sollicité pour traiter les incidents et les aléas d'exploitation. Il est chargé de déclencher et d'accueillir la cellule de crise lorsque la situation l'exige.

Dans les Compagnies majeures, ce sont plusieurs centaines de spécialistes (programme, opérations aériennes, dispatch, maintenance, escales, commercial…) qui se relaient pour assurer une présence continue sur un vaste plateau où convergent toutes les informations nécessaires au suivi. Pour les équipages, en vol ou en escale, le CCO est le point d'entrée unique

En matière de communication opérationnelle, les avions communiquent avec le sol et en particulier avec la Compagnie : ACARS (informations descendantes ou remontantes), messages automatiques (données de maintenance, rapports de turbulence par exemple), téléphone satellite (dans des cas très précis uniquement) ... Tous ces échanges se passent quasi exclusivement entre le CCO et le cockpit (à l'exception de certains messages automatiques).

Aujourd'hui, les 2 principaux facteurs limitant ces échanges sont :

- d'une part la capacité des « tuyaux » de communication : aujourd'hui on ne peut pas envoyer des images (carte météo par exemple) ou de gros volumes de données (comme le contenu des « boîtes noires » en temps réel)
- d'autre part, le sol (CCO) ne veut pas risquer de déranger l'équipage technique pendant une phase de vol très active et restreint sa communication remontante au strict minimum.

Sur le premier point, les progrès sont extrêmement rapides. Les limitations actuelles vont être sans cesse repoussées et vont permettre d'enrichir considérablement les échanges sol-vol y compris de et vers les passagers (voir ci-après). Le problème sera alors d'être extrêmement sélectif pour ne pas risquer de « noyer » le/les pilotes sous un flot d'informations.

A partir du moment où l'avion sera complètement connecté (ex. accès internet au cockpit), l'équipage sera à même de récupérer directement certaines informations aujourd'hui accessibles seulement au sol (exemple carte météo, informations sur l'aéroport de destination…).

Cet accès direct peut constituer un réel avantage, mais il présente également le risque de « distraire » l'attention de l'équipage, qui doit rester pleinement mobilisé sur la conduite de l'avion.

Par ailleurs, le rôle et le fonctionnement du CCO se trouvera forcément impacté par ces évolutions. Il devra s'adapter pour continuer à jouer son rôle de coordination et d'assistance auprès des équipages.

La création d'une fonction « pilote au sol », qui serait en liaison directe et continue avec les avions modifierait radicalement le rôle et le fonctionnement du CCO.

Il faudra bien définir les rôles respectifs du CCO et du « pilote au sol » dans les échanges avec le vol. Il paraîtrait d'ailleurs assez naturel que ces « pilotes au sol » soient en proximité immédiate (géographique et par voies électroniques) du plateau du CCO. Le sujet sera à traiter en fonction du nombre de ces « pilotes au sol » en fonction simultanément.

La communication commerciale

Les nouvelles possibilités offertes par les capacités croissantes des systèmes de communication ouvrent un espace considérable aux échanges avec les passagers.

Contrairement au téléphone en avion qui n'a pas connu le succès escompté, l'accès à Internet dans l'avion semble promis à un très bel avenir, compte tenu de l'appétit sans limite que nous avons tous pour cet outil de communication universel.

Pour les Compagnies, il deviendra possible d'envoyer aux passagers des informations personnalisées sur son voyage (sur l'aéroport d'arrivée, sur les correspondances, …), ou de lui proposer des services complémentaires (gratuits ou payants) et mener des actions de fidélisation. La relation client s'en trouvera largement modifiée.

Mais plus généralement, on peut faire confiance à l'imagination des commerciaux de toute nature qui verront là l'occasion de vendre des services à une population « captive », en tirant pleinement profit de cet espace de temps où le passager est inoccupé et disponible.

Cela peut à terme créer des situations problématiques : les passagers surfant sur le net peuvent ainsi apprendre des informations relatives au vol ou transmettre en temps réel vers le sol des informations sur le vol, sans contrôle de l'équipage ou de la Compagnie, ce qui peut notamment soulever des questions délicates en matière de sûreté.

Et à partir du moment où les passagers seront dotés de ces outils de communication, il parait exclu d'en priver l'équipage. Il faudra alors bien encadrer réglementairement l'usage de ces outils de communication pour éviter qu'il soit une source de distraction ou de perturbation.

LA GESTION DE LA CIRCULATION AERIENNE (ATM)

Dominique COLIN de VERDIÈRE (Membre de l'AAE)

Introduction, contexte et limites de l'exercice

Dans ce chapitre il s'agit d'analyser à l'horizon 2050, les impacts potentiels d'un avion plus automatisé et plus connecté sur l'ATM. Nous ne traiterons pas ici de l'automatisation de l'ATM, même si cela est en partie lié.

A l'horizon 2050, l'ATM devra traiter des drones dans un espace aérien partagé et sur les aéroports ouverts au trafic commercial, mais cela pourra entraîner des restrictions de densité ou de capacité piste.

Les fonctions et les acteurs - la répartition des décisions entre les acteurs

Les fonctions de l'ATM ne changeront pas

Les fonctions à considérer pour l'ATM sont :

- La planification des vols
- Les séparations stratégiques et tactiques
- Le séquencement des avions
- L'anticollision
- Les services d'information aéronautique, d'information de vol et d'information météorologique

Ces fonctions reposent sur des négociations de trajectoire, des autorisations et des instructions. L'évolution en cours de l'ATM est fondée sur les trajectoires (*Trajectory Based Operation*) et le développement des échanges et du partage d'information entre les acteurs. Cette trajectoire est partagée et négociée entre les acteurs pour maintenir des séparations et pour assurer l'écoulement du trafic, en particulier au départ et à l'arrivée des aéroports, en tenant compte des besoins et des objectifs des acteurs.

Les acteurs

Les acteurs suivants se partagent les informations et les décisions

- **Le ou les pilotes à bord ou au sol**
- **Les centres de contrôle des opérations des compagnies aériennes** (CCO)**,** (d'une manière générique l'acteur compagnie aérienne au sol hors pilote au sol)
- **Les services de la navigation aérienne**
- **L**a Défense aérienne des différents États
- La météorologie
- Les aéroports

A chaque acteur on peut associer **des systèmes ou des automatismes** éventuellement partagés et interconnectés.

La répartition des fonctions entre les acteurs

Les fonctions/décisions clés pour l'ATM reposent sur les 3 premiers acteurs avec les systèmes associés. De plus la Défense aérienne, informée par ses propres moyens et par l'ATM de la situation aérienne, est

impliquée pour les actions liées à la sûreté aérienne (vol non identifié, menace, perte de liaison radio, détournement).

La répartition des fonctions, le partage et la localisation des décisions et des responsabilités entre l'ATM, le pilote et le centre de contrôle des opérations des compagnies aériennes, les opérations aéroportuaires et les systèmes associés vont évoluer pour tenir compte du partage des informations, en permettant l'optimisation de la gestion des flottes, du traitement des passagers et des infrastructures aéroportuaires. Ces décisions se font d'une manière collaborative (CDM-*Collaborative Decision Making*), c'est-à-dire en prenant en compte les objectifs et les contraintes des acteurs concernés si possible.

Dans son intervention lors du colloque, Guy Boy a montré que l'ATM est un système complexe comportant de nombreux acteurs humains et machines qui se répartissent des fonctions et communiquent entre eux. Cela peut induire des fonctions émergentes parfois non anticipées. L'accroissement de l'autonomie des acteurs nécessite de nouvelles règles de coordination et une véritable orchestration des fonctions et c'est l'objet des recherches sur l'ingénierie homme système, partie de l'ingénierie système. Les simulations très réalistes permettent aujourd'hui d'analyser de nouveaux scénarios.

Les scénarios de répartition possibles des fonctions entre les acteurs y compris les systèmes, ainsi que les échanges d'information entre eux devraient faire l'objet de travaux approfondis. L'annexe du présent chapitre trace une ébauche de 3 scénarios : actuel, drone et *Single Pilot Operation*.

Les changements d'organisation dans l'ATM

L'évolution des modes de connexion sol-sol, sol-air et air-air peuvent être à l'origine de changement dans la répartition des rôles dans l'ATM :

Rupture du lien géographique entre l'ATC et son espace de responsabilité - virtualisation des centres

La première rupture possible va être celle du lien géographique entre les services de la circulation aérienne, permise grâce aux moyens de communication sol-sol et air-sol délocalisés performants (Liaison de données numériques ou vocales). La virtualisation a commencé avec les tours de contrôle déportées (*Remote Tower*) et elle devrait se poursuivre par le développement de centres en-route déportés permettant d'assurer le service en s'affranchissant de la géographie, des plans de remplacement, des regroupements de centres, des redistributions des secteurs géographiques en fonction des besoins et des ressources disponibles.

Les conditions nécessaires sont la disponibilité de liaisons de données air-sol vocales et numériques fiables accessibles via un réseau sol-sol étendu à la zone couverte et la qualification des contrôleurs pour ces espaces aériens. Cela pose des problèmes de souveraineté lorsque l'on franchit des limites de FIR nationales ou océaniques attribuées par l'OACI. Mais cela permettrait d'envisager une concurrence pour la fourniture de service ATC.

Passage d'une répartition des vols par secteurs géographiques ou volume d'espace aérien à une répartition par vol et groupe de vols sur de grands espaces

Dans ce changement, les fonctions de gestion de trajectoire et de séparation sont assurées par des prestataires au sol qui peuvent être, soit un fournisseur de services navigation aérienne traditionnel, soit un service de compagnie aérienne, soit un opérateur de drone, soit un nouveau prestataire de services.

Outre les problèmes déjà cités, de souveraineté nationale sur les régions d'information de vol (FIR), ce scénario pose des problèmes de coordination entre des prestataires se partageant un espace géographique

donné. Si ce scénario est imaginable en croisière, il paraît irréaliste sur les grands aéroports où une gestion locale restera nécessaire. L'avantage de ce type d'organisation est de permettre d'adapter la capacité aux besoins réels et de permettre une éventuelle mise en concurrence des services. Dans ce scénario on peut envisager une extension des fonctions des services navigation aérienne vers un pilotage des drones.

Délégation des séparations à bord au pilote ou à des automatismes (ASAS full self-separation)

La possibilité technique grâce à l'ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance- Broadcast*) et les liaisons Air-Air de délégation de la responsabilité des séparations à bord (ASAS *Airborne Separation Assurance System*) peut remettre en cause la répartition des rôles entre le sol et le bord. Cette délégation peut être ponctuelle ou complète (ASAS *self-separation*).

Ce scénario a été envisagé dès les années 90 avec le développement des fonctions ADS-B-Out et ADS-B-In permettant d'échanger les positions et les intentions de vol entre avions. Il est dans le Concept Opérationnel Mondial ATM de l'OACI. S'il fait l'objet de travaux de R&D sur son utilisation par délégation ponctuelle de responsabilité de l'ATC au sol vers le pilote à bord, sa version de délégation complète sur de larges espaces ou le long d'une trajectoire n'a pas reçu de soutien effectif des autorités de l'aviation civile. Les orientations vont plus vers un système au sol basé sur les trajectoires, qui est plus prédictible en laissant moins de liberté.

Ce scénario pose des problèmes de responsabilités, de cohérence des solutions dans la résolution de conflit à plus de deux avions, de maîtrise de la complexité et de charge de travail à bord. Il pourrait réduire les coûts liés à l'ATC au sol en particulier dans les espaces peu denses.

Les avions sans pilote à bord

A l'horizon 2050 les avions sans pilote à bord (mais avec pilote au sol) seront une réalité et partageront l'espace aérien avec les avions de transports de passagers. Ils seront utilisés pour des missions diverses de télécommunications, de surveillance/monitoring, de travail aérien ou de transport de fret.

Les systèmes spécifiques suivants auront été développés pour que les drones puissent s'insérer dans l'espace aérien et être gérés par l'ATM :

Des systèmes automatiques embarqués :

- Un système de séparation à vue des autres aéronefs, des obstacles et des phénomènes météorologiques dangereux, basé sur des caméras vidéo (complété par des lidars ?)
- Un système de séparation embarquée des aéronefs coopératif basé sur l'ADS-B.
- Un système embarqué pour l'anticollision avec les autres aéronefs (évolution ACAS *Airborne Collision Avoidance System*) et le sol (GCAS *Ground Collision Avoidance System*)

Des systèmes d'assistance aux opérateurs au sol

- Une liaison de données sécurisée (*Control and Command*) pour la gestion des trajectoires à distance (initialisation, changement et déroutement éventuel) et la prise en compte les instructions de l'ATC.
- Un système de visualisation déporté au sol pour assister le pilote de drone en particulier au roulage au sol et à l'atterrissage.

Les instructions de l'ATC sont transmises à l'aéronef par une liaison sol-air-sol (ou sol-sol)[154] entre l'ATC et le pilote au sol. En cas de perte de liaison de données, l'aéronef poursuit sa trajectoire et l'ATC le considère sur sa trajectoire et il est suivi, si possible par des moyens de surveillance (ADS-B ou radar) indépendant de la liaison de données de contrôle commande.

Sur les aéroports, le séquencement opéré par l'ATC au décollage ou à l'atterrissage est communiqué à son télé-pilote qui modifiera sa trajectoire pour se placer derrière celui qui le précède.

Après leur développement et mise au point pour les drones, ces équipements pourront être utilisés pour des aéronefs de transport plus autonomes.

Quelle automatisation embarquée pour l'ATM ?

Dans ce paragraphe, les automatismes embarqués pouvant contribuer à l'amélioration de l'ATM sont recensés.

Gestion de trajectoire

La gestion de trajectoire dans un repère fixe par rapport à la terre constitue la base du système ATM. Encore faut-il pouvoir l'échanger facilement avec le sol (voir application data-link) ?

Les moyens actuels de navigation permettent une gestion de la trajectoire dans les 2 dimensions horizontales avec une très bonne précision.

La troisième dimension verticale est gérée de manière précise en pallier (RVSM – Reduced Vertical Separation Minima) et à l'atterrissage avec les moyens au sol et satellitaire (ILS cat III, LPV - Localizer Performance with Vertical guidance), mais est beaucoup moins précise en montée ou en descente, car alors elle pose des problèmes de référence air/barométrique ou terrestre/altimétrique, et de performance en montée des moteurs en fonction de l'état de l'atmosphère.

La 4ème dimension temporelle est aujourd'hui traitée avec des estimations de temps de passage en des points ; les projets en cours cherchent à utiliser des instants de passages contrôlés en des points de la route (rendez-vous) - pour être efficace cela nécessite des prévisions météo précises.

Aujourd'hui l'évitement des phénomènes météorologiques dangereux se fait essentiellement à vue et en utilisant le radar météorologique embarqué.

Le développement de l'ADS-B Out et In a permis d'envisager une gestion de trajectoire relative entre aéronefs. Des fonctions ASAS (*Airborne Separation Assurance System*) ont été définies et sont en cours de développement. Elles ont pour but de maintenir les séparations entre avions ou de se placer derrière et suivre un autre avion à une certaine distance ou intervalle temporel.

Système anticollision embarqué

Le système anticollision avec des avions équipés de transpondeur (ACAS- *Airborne Collision Avoidance System*) a été rendu obligatoire dans les années 1990 et la manœuvre automatique d'évitement a été développée pour certains avions. Une version améliorée, utilisant les informations ADS-B, est en cours de développement ACAS-X, pour accepter des trafics plus denses autour des aéroports.

Pour l'Anticollision avec le sol, le E-GPWS (*Enhanced Ground Proximity Warning System*) donne une alarme au pilote, mais des systèmes à commande automatique ont été développés pour des avions d'affaire ou des avions d'armes (GCAS- *Ground Collision Avoidance System*)).

154 Le lien sol-air-sol est celui qui entraîne le moins de changement sur le fonctionnement de l'ATC car tous les aéronefs pilotés et drones sont traités de la même façon, tandis que le lien ATC sol-sol entre contrôleur et télépilote marque un changement.

Pour les drones des systèmes *Detect and Avoid* sont étudiés et basés sur divers capteurs dont la vidéo pour assurer l'anticollision avec les obstacles et des aéronefs non coopératifs. A terme cela pourrait être mis en œuvre à bords des avions.

Système sur les aérodromes

Afin de rendre plus sûr et plus efficace les atterrissages des systèmes de freinage optimisé ont été développés : *Brake to Vacate* et *Runway Overrun Prevention System*.

On a évoqué plus haut les systèmes de suivi d'un autre avion. Si l'on envisage des systèmes de remise de gaz automatique, la décision de remise de gaz peut-elle être automatisée ?

Pour faciliter le roulage au sol, il y a déjà des systèmes de prévention des collisions au sol (SMGCS *Surface Management, Guidance and Control System*), qui devront être connecté aux avions, mais des systèmes de taxiage automatique sont en cours d'études.

Applications data-link

Depuis 30 ans on dispose un catalogue complet d'applications data-link (ADS-C et CPDLC *Controller-Pilot Data Link Communication*), mais si elles sont utilisées en espace océanique (FANS – *Future Air Navigation System*), elles restent peu utilisées en zones continentales denses pour des raisons d'équipement, de formation et d'habitude des contrôleurs.

Pourtant l'intérêt pour la sécurité et la capacité est prouvé pour des applications simples comme les paramètres avions descendants ou le changement de fréquences.

Dans toutes ces fonctions automatisées le pilote à bord conserve un rôle important pour leur mise en œuvre avec des choix, des approbations ou des réjections, des validations et une supervision.

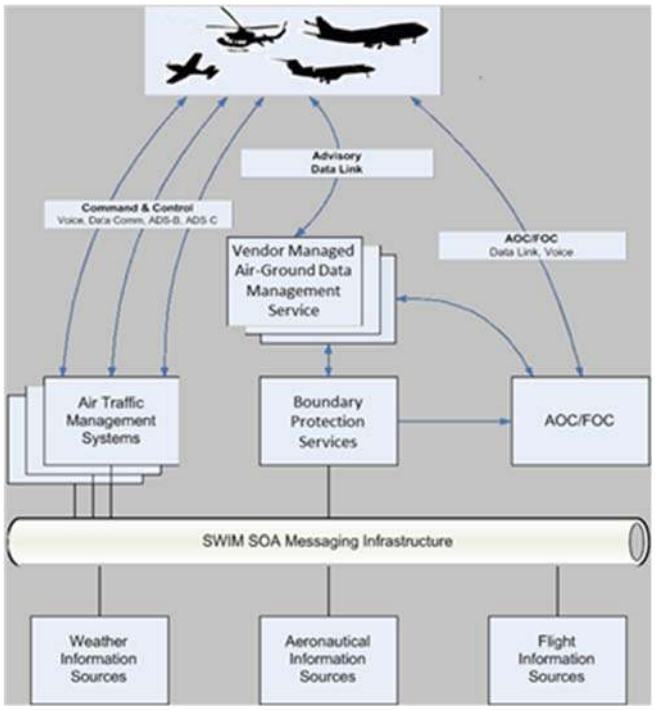
Un système d'informations partagées et les réseaux

Le partage d'information

Les informations aéronautiques, météorologiques et de trafic seront recueillies, partagées, diffusées et distribuées au travers des réseaux air-sol et sol-sol, voire air-air, d'une manière transparente entre tous les acteurs au sol ou à bord, y compris vers et depuis les calculateurs bords.

Figure 1 : SWIM et liaisons de données Air-Sol

(source ICAO-Doc 10039 SWIM Concept Manual)



Les liaisons Air-Air permettent d'échanger directement des informations entre avions (Météo, trafic, coordination d'évitement).

Le partage d'information est développé au travers du concept SWIM (*System Wide Information Management*) qui définit un Extranet spécifique auxquels ont accès tous les acteurs y compris à terme les aéronefs et les pilotes. Il repose sur la définition de règles d'emploi, des modèles de données, des architectures systèmes, des protocoles d'accès.... SWIM servira de base pour la fourniture de services au sol et embarqués.

Les services SWIM (voir Figure 1) utiliseront différents types de liaison de données numériques qui dépendent des exigences de sécurité requises. Les plus sécurisées sont les liaisons ATC vocales et de données pour les applications CPDLC et ADS, les autres liaisons AOC (*Airline Operational Control*) et fournitures de services d'information tels que la météorologie, l'information de vols ont des exigences moindre en terme de sécurité mais plus de débit. Les premiers domaines d'information, qui disposeront de standard d'échanges, sont :

- L'information aéronautique (AIXXM)
- L'information météorologique I(WXXM)
- L'information trajectoire-plan de vol (FIXM)

La validation de ces données sera fondamentale pour assurer le fonctionnement sûr du système et des automatismes les utilisant.

La connectivité des avions et l'ATM

Le développement de la connectivité par les liaisons de données sécuritaires ou non est à la base de l'évolution de l'ATM, partant d'un système basé essentiellement sur les communications vocales qui subsisteront pour des actions tactiques ou d'urgence. Les informations de surveillance basés au sol, à bord ou satellitaires seront disponibles au sol et à bord au travers des équipements embarqués des avions coopératifs. Cette situation aérienne instantanée sera complétée par le partage des trajectoires prévues, négociées voire contractées. Ceci devrait rendre le système plus sûr et plus prévisible.

Conclusion

L'ATM bénéficiera de l'évolution vers plus d'automatisation et de connexion à bord, et supportera une gestion du trafic basée sur les trajectoires, le partage d'information et le CDM.

Cette évolution contribuera à la réduction de l'incertitude et à une plus grande efficacité de l'ATM et permettra des changements importants dans la répartition des rôles entre les acteurs principaux (pilote au sol ou à bord, opérateurs aériens/compagnies et services de la navigation aérienne). Cela aura un impact sur le transport aérien lui-même avec des conséquences organisationnelles, sociales et géopolitiques. Les évolutions dépendront des conditions locales ou régionales, mais le fonctionnement à l'échelle mondiale nécessitera le développement de normes assurant en particulier l'interopérabilité.

La place de la délégation de séparation à bord ou à d'autres acteurs que l'ATC n'est pas acquise, alors que l'anticollision, d'abord entre les avions coopératifs, puis à vue sera automatisée.

Le risque peut porter sur la capacité des aérodromes saturés, mais il sera peut-être plus facile d'amener les avions bien espacés en courte finale, avec de l'espacement embarqué automatique coopératif.

La complexité de l'ATM sera accrue par le partage d'un même espace aérien ou d'un aérodrome par des aéronefs ayant des degrés divers d'automatisation, du drone à l'avion actuel. Ceci nécessitera une compatibilité ascendante des systèmes et des procédures compatibles qui est un problème difficile.

Recommandations

Il convient d'étudier de nouvelles répartitions des fonctions, des rôles et des décisions entre l'ATC au sol, le CCO au sol et le pilote et les automatismes associés, et de les évaluer au plan de la faisabilité et des performances.

Des travaux sont en cours pour déterminer à quelles conditions le service de contrôle peut être fourni par vol ou paquet de vols au lieu d'une répartition géographique par secteur ? L'insertion des drones dans des espaces non ségrégués et sur les aéroports avec le niveau sécurité acceptable fait l'objet d'étude entre autres dans le cadre du programme SESAR ; il faudra en analyser l'impact sur la capacité de l'espace aérien et des pistes.

Il faut étudier comment développer des procédures ATC qui utilisent au mieux les automatismes embarqués et quels sont les automatismes embarqués qui rendent l'ATC plus performants (cf. exposé d'Éric Hoffman avec l'exemple des procédures Point-merge, qui rendent le système plus prédictible et plus facile à gérer).

Des études doivent être menées pour déterminer comment on peut assurer la cohabitation entre des avions de « capabilités » différentes dans un même espace ? (BCBS Best Capable Best Served et conséquences/acceptabilité) (*Sujet évoqué à l'OACI ou dans SESAR mais où je n'ai pas vu de réponse satisfaisante)*

Annexe : Ébauche de scénarios de répartition des fonctions

Cette analyse est une première ébauche menée sur 3 scénarios : le système actuel, les drones et les opérations à un seul pilote à bord.

Selon Parasuraman[155], l'automatisation peut porter sur les fonctions

- Capteurs
- La mémorisation et présentation des informations
- La décision
- L'action

Avec les niveaux différents suivants pour la décision et l'action

Levels of Automation of Decision and Action Selection

Automation:

High ↑

10. decides everything, acts autonomously, ignoring the human
9. informs the human only if it decides to
8. Informs the human only if asked
7. executes automatically, then necessarily informs the human
6. allows the human a restricted time to veto before automatic execution
5. executes suggestion if human approves
4. suggests one alternative
3. narrows the selection down to a few alternatives
2. offers a complete set of decision/action alternatives

Low 1. offers no assistance, human must take all decisions and actions

Abréviations

A	Automate/Système
Ax	Automatisation niveaux de 1 à 10
ATCo	Air Traffic Controller
CCO	Centre de contrôle des opérations
GPF	Ground Pilot Flying (pilote au sol)
GPNF	Ground Pilot Not Flying
H	Homme
NM	Network Manager
PF	Pilot Flying
PNF	Pilot Non Flying
SNA	Services de la Navigation Aérienne

155 Parasuraman *et al.*: Types and levels of human interactions with automation 2000

1 - Scénario actuel

Fonctions	Compagnies aériennes	ATM	Capteur	Présentation Mémorisation	Décision	Action
Pilotage-Commande	PF		A + H vision/perception	A	A1-A10	
Pilotage-Trajectoire	PF		A	A	A1-A3	
Pilotage-surveillance	PNF		A + H vision/perception	A	No	No
Anticollision	PF		A	A	A4 - A6	Y/N
Planification Négociation trajectoire	CCO	SNA (NM)		A	A1-A2	
Séparation Stratégique		ATCo	A	A	A1 -A2	
Séparation tactique		ATCo	A	A	A1-A2	Vers PF
Séquencement		ATCo	A	A	A1-A4	Vers PF
Autorisation Instruction		ATCo	A	A	A1-A4	Vers PF

2 - Scénario drone

Fonctions	Compagnies aériennes	ATM	Capteur	Présentation Mémorisation	Décision	Action
Pilotage-Commande	GPF		A + H vision/perception	A	A1-A10	
Pilotage-Trajectoire	GPF	ATCo ?	A	A	A1-A3	
Pilotage-surveillance	GPNF		A + H vision/perception	A	No	No
Anticollision			A	A	A4 – A10 ?	Y/N
Planification Négociation trajectoire	CCO	SNA (NM)		A	A1 à A2	
Séparation Stratégique		ATCo	A	A	A1-A2	Vers GPF
Séparation tactique		ATCo	A	A	A1-A 2	Vers GPF
Séquencement		ATCo	A	A	A1-A4	Vers GPF
Autorisation Instruction		ATCo	A	A	A1-A4	Vers GPF

3 - Scénario SPO Single Pilot Operation

Fonctions	Compagnies aériennes	ATM	Capteur	Présentation Mémorisation	Décision	Action
Pilotage-Commande	PF		A + H vision/perception	A	A1-A10	
Pilotage-Trajectoire	PF+ GPNF ?	?	A	A	A1-A3	
Pilotage-surveillance	GPNF		A + H vision/perception	A	No	No
Anticollision	PF		A	A	A4 - A6	Y/N
Planification Négociation trajectoire	CCO	SNA (NM)		A	A1-A2	
Séparation Stratégique		ATCo	A	A	A1-A2	
Séparation tactique		ATCo	A	A	A1-A2	Vers PF
Séquencement		ATCo	A	A	A1--A4	Vers PF
Autorisation Instruction		ATCo	A	A	A1-A4	Vers PF

LES BESOINS EN TELECOMMUNICATIONS

Luc DENEUFCHATEL (Expert invité)

Les besoins de communication à l'horizon 2050 associés à une plus grande automatisation de l'aviation

La typologie actuelle des communications air/sol (ATC, AOC, APC)

Les communications air/sol ou « Aeronautical Mobile Service » (AMS) se composent de quatre catégories par l'Union Internationale des Télécommunications (UIT), à savoir :

1. deux catégories associées à la sécurité et la régularité du vol (Air Traffic Services – ATS -, Airline Operational Communication– AOC -)
2. deux catégories associées aux besoins administratifs des compagnies aérienne et aux besoins des passagers en cabine (Airline Administrative Communications – AAC -, Aeronautical passengers communications – APC -)

Sur cette base sont déterminés, au niveau de l'UIT, l'accès aux ressources spectrales et les marges de protection associée aux divers services.

Dans le cadre de cette étude, seules les communications de type ATS sont pertinentes, car elles sont fortement liées aux exigences de sécurité. Le chapitre suivant permet de mieux consolider ce choix.

Les tendances actuelles au niveau des architectures avion

L'évolution de l'architecture des systèmes de communication Air/Sol au niveau avion suit une tendance assez claire, à savoir :

- Une très forte ségrégation entre le monde « cabine » et le monde « cockpit » pour des raisons liées à la cyber-sécurité,
- Au niveau du cockpit une ségrégation forte entre les services régulés (ATC et AOC classique) et non régulés (EFB) pour des raisons liées à la sécurité,
- Pour les services non régulés, l'utilisation de standards et de systèmes du monde ouvert.

Ceci conduit donc à l'identification de 4 grands flux de communication à partir de l'avion :

- Les communications ATS fortement régulées et contraintes (systèmes normalisés par l'OACI et bandes de fréquences dites « Safety of Life ») : les besoins d'échanges de données pour un avion connecté sont à classer dans cette catégorie,
- Les communications AOC contribuant à la conduite du vol : ces services de communications ont historiquement partagé les mêmes ressources que les services de communications ATS[156],

[156] Certaines applications EFB peuvent transférer certaines données aux systèmes avion, dans ce cas ces applications sont soumises aux mêmes processus de certification et d'approbation opérationnelle que les applications réglementées.

- Les nouveaux services AOC qui accèdent au monde ouvert : ils sont associés au système Electronic Flight Bag (EFB). Ces services de communication sont très peu régulés par les autorités[157],

- Les services cabine au profit des passagers qui utilisent le monde ouvert : fournisseurs de service non spécifiquement aéronautique, protocole IP, etc...

Cette évolution au niveau avion doit être prise en compte dans notre réflexion : compte tenu des aspects sécurité spécifiquement liés à la notion d'avion connecté avec le monde extérieur, les moyens et services de communication à envisager ne peuvent appartenir qu'à la première catégorie. Ces communications doivent répondre aux exigences de sécurité formulées par les autorités réglementaires.

La diversité des besoins en fonction des types d'espace et d'opération

Il est essentiel de reconnaître la diversité des besoins de communication air/sol en fonction des types d'espace ou des opérations aériennes.

S'agissant de la diversité des besoins en fonction du type d'espace, c'est surtout applicable aux communications ATS (et par extension aux besoins spécifiques des avions connectés). Cette diversité de besoins est liée à :

1. la densité du trafic à gérer et aux modes et minima de séparations de trafic pratiquées. Dans les espaces denses les performances demandées aux moyens de communication sont beaucoup plus élevées que dans les espaces à faible densité,
2. la criticité des performances exigées dans le cas d'avions connectés, pour lesquels certains échanges de données sont directement liés à la sécurité du vol.

Il n'existe donc pas de solution unique qui soit optimum pour répondre à ces divers besoins dans ces divers contextes.

Par contre, l'interopérabilité des systèmes de communication est une exigence majeure, qui conduit à limiter le nombre de technologies à utiliser.

Les exigences techniques caractérisant les besoins opérationnels

On peut classer les exigences techniques des moyens de communication en 4 grandes familles d'exigences, lesquelles sont particulièrement pertinentes pour la catégorie ATS :

1. La latence des échanges : essentiellement liées à la complétude des transactions entre les éléments sol et les éléments embarqués, (durée max)
2. La capacité de transmission : essentiellement liées au nombre de mobiles que le système peut accepter et au débit global,
3. L'intégrité des échanges : essentiellement liées à la capacité du système de détecter et de corriger les erreurs induites sur l'information transférée,
4. La disponibilité du service : essentiellement liées aux risques de défaillance du système et aux mitigations possibles.

Ces quatre familles sont détaillées ci-après.

La latence des échanges

L'évolution progressive des concepts de gestion du trafic aérien ont nécessité le besoin de fixer des exigences de performances en pleine cohérence avec les objectifs de sécurité fixé à chaque vol.

[157] Bien sur l'exploitation des informations échangées via ces services peut faire l'objet d'exigences réglementaires spécifiques

Cette formalisation a surtout été mise en œuvre avec l'émergence des échanges de données entre avion et système sol qui sont appelés à devenir dans la prochaine décennie le mode primaire de communication air/sol.

Les échanges vocaux dans ce futur environnement seront uniquement associés à des besoins d'intervention tactiques sur un vol (le mode nominal étant purement stratégique – trajectory based operations -).

Ces exigences de performance des systèmes de communication sont dérivées d'une approche « top-down » consistant en partant d'une durée maximale pour réaliser une transaction air/sol (i.e. en général composée de deux séquences minimales : une requête dans une direction et une réponse à cette requête dans l'autre direction). Elles se traduisent par une exigence de latence (nominale + Variance).

Elles donnent lieu généralement à une allocation entre les divers éléments impliqués dans la transaction (ATC contrôleur, pilote, réseau sol/sol, réseau air/sol).

C'est le résultat de cette allocation qui définira les performances du système de communication.

La capacité de transmission

Une autre exigence essentielle pour le développement de solution technologique adaptée aux besoins futurs de l'ATM concerne la capacité du système à répondre à l'ensemble du trafic envisagé à long terme.

Ces besoins longs termes reposent sur des hypothèses d'évolution des flux aériens lesquels sont très fortement dépendant du contexte économique qui prévaudra pour chaque période de temps.

Dans le cadre de la planification européenne (European ATM Master Plan – EATM-), l'objectif initial en 2007 visait un triplement du trafic à l'horizon 2030 avec un doublement du trafic à l'horizon 2020 (sur la base du trafic de 2000). La révision de l'EATM publiée en 2015, considère que la tendance change significativement pour viser un simple doublement en 2035 sans fixer pour le moment un objectif de triplement.

Reste une inconnue significative non formellement prise en compte à ce stade : les drones en espace aérien non ségrégué.

Les drones soulèvent un problème plus complexe que les avions pilotés en matière de communications air/sol : ils nécessitent des liaisons continues pour assurer du sol leur contrôle et leur envoyer des commandes, des liaisons continues pour relayer les communications vocales et les échanges de données entre les télé-pilotes/systèmes associés et les organismes de contrôle/systèmes associés, et des liaisons continue ou à la demande pour transmettre les données de charge utile. La première liaison est en général numérique et doit être sécurisée, et avoir un très haut niveau de fiabilité. La liaison entre les télé-pilotes et les organismes de contrôle doit répondre aux exigences de l'ATM mais elle peut être redondée en ultime secours par une coordination directe entre télé-pilote et organisme de contrôle par téléphone. La troisième liaison n'est pas essentielle pour la sécurité et peut utiliser des canaux non régulés. Si les données associées à cette liaison sont sensibles, elles seront cryptées.

Les gros drones, genre drones de surveillance maritime, qui sont susceptibles de voler dans l'espace non-ségrégué seront équipés à la fois de liaisons directes air-sol, utilisables lorsqu'ils sont en vue directe de la station sol ou via des relais au sol, et de liaisons par satellites. La dernière Conférence Mondiale des Radiocommunications du mois de novembre 2015 n'a pas pu finaliser la discussion sur les bandes de fréquences à utiliser et spécifiquement l'utilisation possible de bandes de fréquence non Safety of Life pour les communications C3 (contrôle-commande-communication) pour opérer des drones. Le sujet est très controversé. Le sujet des communications C3 avait déjà été traité en 2012 et une bande de fréquence avait été retenue, entre 5030 et 5091 MHz (allocation existante pour le service mobile aéronautique par satellite). Un document très intéressant, pour justifier la largeur de bande, avec pas mal

d'indications sur les besoins des drones, qui sont finalement très raisonnables avait été présenté par la CEPT (conférence européenne des postes et télécommunications).

Si le développement des drones est une réalité incontournable pour couvrir de nombreuses applications, le nombre de drones nécessitant des opérations dans les espaces aériens non ségrégués reste difficile à appréhender aujourd'hui, d'autant que les solutions techniques pour rendre possible cette intégration sont encore à identifier et à valider.

Le consensus actuel est donc que les hypothèses révisées de croissance du trafic intègrent bien ces nouveaux acteurs (ce qui implicitement indique que ce ne sera pas l'explosion dans les espaces contrôlés non ségrégués).

L'intégrité des échanges

Les études de sécurité qui sous-tendent les nouvelles fonctionnalités ATM (4D trajectory management), conduisent à formuler des exigences d'intégrité sur les informations échangées entre avion et systèmes sol. Ce type d'exigence est en générale satisfait via l'introduction de mécanismes de codage de l'information permettant d'une part de détecter des erreurs et même de les corriger partiellement. Néanmoins les mécanismes d'intégrité inhérents au système de communication contribuent de facto à rendre les liaisons plus efficaces (réduction du nombre de retransmissions en cas de détection de corruption de message).

La disponibilité du service

Une autre exigence essentielle associée au système de communications air/sol c'est la disponibilité. Il s'agit de la probabilité de perdre le service au cours d'un vol dans un espace donné.

On associe généralement une autre exigence liée à la disponibilité, appelée « continuity of service » qui caractérise la probabilité qu'une transaction avec un avion ne soit pas finalisée. Dans ce genre de situation, le problème consiste à mettre en place une mitigation opérationnelle.

Evaluation des besoins associés aux évolutions de l'ATM

Les travaux menés dans le cadre des programmes SESAR et NEXGEN ont montré que les besoins en communications mobiles pour répondre aux besoins des évolutions ATM ne sont pas très élevés en matière de débit moyen par avion (inférieur à 20 kb/s dans les phases de vol les plus exigeantes).

Par contre ces mêmes travaux ont mis en évidence le besoin de comportement déterministe : garantir un accès à la ressource de communication pour borner la variabilité de la latence des transactions. Il faut noter que les protocoles IP ne comportent généralement pas de mécanisme de priorisation des accès, la qualité de service est donc totalement dépendante du dimensionnement des capacités de communication par rapport à la demande. Dans les réseaux commerciaux de communication, cette capacité maximale est souvent dix fois supérieure à la demande moyenne (à distinguer de la demande instantanée).

Il subsiste une inconnue importante en ce qui concerne le partage d'information dans le futur environnement ATM : le concept System Wide Information Management (SWIM) est en effet une mise en réseau de l'information dans les différents domaines (Météo, Information aéronautique, données de vol,..) à partir de divers serveurs auxquels les divers acteurs deviennent clients. Ceci s'applique également à l'avion qui peut être client de serveurs au sol (flux montant d'information) ou même serveur (flux descendant d'information) pour donner accès au profil de vol par exemple. Ces échanges de nature diverse seront réalisés sur des liens commerciaux pour l'essentiel et pour certains échanges sur des liens réglementés (en fonction de la nature et de l'utilisation des informations et de leur caractère critique). Il est néanmoins évident que les contraintes des liaisons réglementées (et leur limite en termes de débit) seront prises en compte dans la mise en œuvre effective de ce concept généreux en ce qui concerne

quelques informations critiques (toutes les informations partagées ne sont pas essentielles pour assurer les futures missions de l'ATM !).

Il est évident que les besoins spécifiques liés à l'avion connecté risquent de générer des débits beaucoup plus importants (i.e. transfert vidéo). Les contraintes liées à la limitation du spectre disponible pour ces communications sécuritaires déjà très sévères pour satisfaire les besoins ATM, risquent donc d'être sans solution dans le cas de l'avion connecté. Les prochains chapitres aborderont ces contraintes de manière détaillée.

Il y a aussi le besoin de pouvoir transmettre en vol un sous ensemble des données des enregistreurs de vol, en cas d'évènement grave pouvant conduire à la disparition de l'avion au fond d'un océan lointain (travaux en cours se traduisant par un nouveau standard pour les Emergency Locator Transmitter (ELT) intégrant cette fonction).

Faut-il couvrir ces besoins de manière unique en termes de technologie ?

Afin de répondre à ces exigences techniques pour couvrir les communications mobiles avion/sol, on peut imaginer disposer d'une solution « magique » capable de les satisfaire. Mais comme nous l'avons vu précédemment les communications mobiles sécuritaires obéissent aux contraintes de l'environnement ATM. Une des contraintes c'est l'accès au spectre radioélectrique : une allocation spectrale suffisante, avec la caractéristique « Safety of Life 158», accessible au service mobile aéronautique capable de couvrir l'ensemble des exigences de capacité et de performances.

Cette question a été analysée par l'OACI au cours de la dernière décennie.

Les travaux de l'OACI

Le Comité Communications Aéronautiques de l'OACI (ACP) a longuement travaillé sur les besoins long terme en communications mobiles aéronautiques pour satisfaire les évolutions de l'ATM159.

L'ACP, suite aux recommandations formulées par la Conférence de Navigation Aérienne de 2003 (ANC 11), a comparé l'ensemble des technologies des communications mobiles aux besoins de l'ATM à l'horizon 2030, de manière à identifier des technologies développées pour le domaine commercial et concurrentiel pouvant également satisfaire les exigences de l'ATM futur.

L'idée était d'évaluer les performances de ces systèmes/technologies par rapport aux 4 types d'exigences présentées dans les précédentes sections, de filtrer les technologies pouvant les satisfaire, puis d'analyser la portabilité de ces technologies dans des bandes de fréquences aéronautiques (pour répondre aux exigences « Safety of Life »). En tenant compte des possibilités très réduites au niveau de l'accès au spectre.

Après avoir passé au crible 70 technologies environ (déjà déployée ou en cours de développement), suivant un processus complexe étalé sur 5 à 7 années (essentiellement alimenté par la FAA et ITT du côté USA et Eurocontrol et Quinetic côté européen, la conclusion de ce Comité était la suivante :

1. Aucun des systèmes de communication mobile parmi l'ensemble analysé ne permet de couvrir les besoins de l'ATM et d'être déployé dans les bandes de fréquences accessibles pour ce service.

---

158 Un service « safety of life » bénéficie au niveau de l'UIT d'une protection supplémentaire vis-à-vis des interférences des autres services. Cette « safety margin » correspond à une protection contre les interférences légales de 6 dB supplémentaires par rapport aux règles générales de l'UIT.

159 Ces travaux à l'OACI n'ont jamais pris en compte les besoins associés au concept de l'avion connecté.

2. Un système répondant aux exigences de l'ATM et aux contraintes d'accès au spectre doit être défini spécifiquement

3. Les briques technologiques développées par l'industrie des radios communications mobiles sont réutilisables pour concevoir un système dédié à l'ATM

4. En tenant compte de la criticité des échanges de données entre avion et systèmes sol dans le concept opérationnel envisagé (i.e. Trajectory Based Operation –TBO- et gestion stratégique et non plus tactique des vols), le comité recommandait la normalisation de deux liens de performances équivalentes pour garantir le niveau de disponibilité envisagé.

5. Les communications vocales resteront nécessaires pour couvrir les situations non nominales telles que les situations d'emergency, les défaillances de certains éléments des systèmes de communication (y compris es situations d'interférence radio électrique) et les besoins tactiques.

Les solutions technologiques proposées par l'OACI

Suite à l'analyse globale présentée dans la section précédente, l'ACP a également émis des recommandations concernant la mise en œuvre d'une infrastructure de radio communication mobile robuste s'appuyant sur des systèmes diversifiés sur le plan technologique et spectral.

Pour conforter cette recommandation le comité a identifié 3 nouveaux systèmes (diversifiés en termes de technologie et de spectre utilisé), qu'il convient de définir (en s'appuyant éventuellement sur des briques technologiques existantes) qui pourraient répondre à ce besoin :

1. Un système exclusivement réservé aux communications au niveau surface aéroportuaire (excluant à priori les pistes) instanciant la technologie WIMAX dans une bande aéronautique (5091 – 5150 MHz) : ce système est connu sous le nom d'AeroMacs,

2. Un système cellulaire terrestre appelé à opérer dans la bande DME (960 – 1224 MHz) en cohabitation avec les DMEs, le Mode S, le GNSS et le MIDS (système de communication mobile de l'OTAN pour les avions militaires) : ce système est connu sous le nom de LDACS160,

3. Un système satellitaire (évolution de systèmes existants comme Inmarsat SBB[161] ou Iridium/Iridium Next : ces systèmes sont souvent référencés sous le nom NexSAT.

A noter que les deux derniers systèmes (LDACS et NexSAT) ont vocation à fournir des services en zones continentales pour l'En route et la TMA. Ils peuvent ainsi constituer les deux piliers d'une architecture « dual links » comme recommandée par l'OACI.

Le système AeroMacs de son côté est strictement limité aux besoins de surface aéroportuaire (en excluant d'ailleurs les pistes).

Il est important de noter qu'une solution satellitaire pourrait parfaitement couvrir l'ensemble des types de besoins aéronautiques (ATS, AOC et APC). La ségrégation logique de ces différents types de service est alors une exigence d'entrée forte pour la conception et l'architecture du système (mécanisme

[160] A noter qu'à ce stade il existe deux propositions concurrentes pour ce système : le LDACS1 s'appuyant sur une couche physique de type OFDM (utilisée pour la diffusion TNT), le LDACS2 s'appuyant sur une couche physique de type GSM (grand retour d'expérience avec l'utilisation du GSM durant les 20 dernières années)

[161] L'agence Spatiale Européenne a lancé il y a quelques années le programme Iris (ARTES 10) dont l'objectif est de répondre à cette recommandation de l'OACI et de contribuer ainsi aux travaux du programme SESAR. Le programme Iris comporte aujourd'hui deux grandes étapes : l'évolution du système Inmarsat SBB sous le nom de « Precursor » et la définition d'un système pour le plus long terme répondant aux objectifs fixés par l'OACI et le programme SESAR

d'allocation déterministe de la ressource de communication pour satisfaire les priorités de chaque message)162.163

Certains systèmes satellitaires intègrent des charges spécifiques pour fournir ces services pour satisfaire les exigences de sécurité

La criticité des liaisons de communication entre systèmes sol et systèmes embarqués dans une optique de plus grande automatisation

La diversité technologique et spectrale nécessaire pour répondre à l'exigence de disponibilité pour les besoins ATM

Comme déjà évoqué au paragraphe précédent, l'idée d'une diversification technologique comme réponse aux exigences de disponibilité n'est pas nouvelle. Elle a été mise en lumière lors des travaux sur les besoins moyens et longs termes en matière de radio communication air/sol.

Elle a conduit l'OACI à identifier les trois nouveaux systèmes nécessaires pour répondre aux besoins de l'ATM à moyen et long terme :

a) Un système dédié pour les communications de surface aéroportuaire
b) Un système terrestre pour les espaces En route et TMA
c) Un système satellitaire pour les espaces océaniques mais aussi pour les espaces denses en complément du moyen terrestre.

Le programme SESAR a repris ces trois orientations dans son programme. Malheureusement seuls les travaux sur le système aéroportuaire ont abouti à ce stade. Néanmoins il n'est pas certain que cette technologie dérivée de celle du WIMAX soit disponible très longtemps compte tenu de l'obsolescence actuelle de la technologie WIMAX remplacée par le LTE (4G).

Il n'y a aujourd'hui aucun plan de déploiement de cette technologie en Europe, seule la FAA a choisi de la déployer pour couvrir ses besoins de réseaux d'infrastructure de ses aéroports. A noter que la FAA n'envisage pas l'utilisation de cette infrastructure pour les besoins de communication mobiles avec les avions. La justification de l'utilisation de bandes de fréquences « safety of life » repose sur le fait que ce complément de réseau d'infrastructure permettra de remplir des missions liées à la sécurité de l'ATM

Concernant le système terrestre LDACS, deux possibilités étaient en compétition. Les deux systèmes s'appuyaient sur une couche liaison (au-dessus de la couche physique) intégrant des mécanismes d'allocation dynamique des ressources de manière à assurer un comportement déterministe au niveau des communications (i.e. des ressources réservées pour chaque avion « loggé » dans la cellule de communication garantissant un accès sans attente pour formuler une requête). La différence principale entre ces deux possibilités était le choix de la forme d'onde (couche physique) : l'une s'appuyait sur une

162 A noter les travaux SESAR sur ce sujet proposant la définition de classes de service. Chaque classe de service est associée à une série d'exigences de performances (latence, intégrité, disponibilité, continuité de service) et à un niveau de priorité. Ces résultats SESAR sont maintenant repris dans les travaux de l'OACI pour développer des exigences de performances des systèmes de communication, les « Required Communication Performances » (RCP) dont le premier exemple est le Manuel Global Operational Data Link Document (Gold) fixant les exigences pour les espaces océaniques.

163 En règle générale ces contraintes d'architecture sont dimensionnantes et doivent être prises en compte dès la conception ce qui suppose d'avoir un « business case » très favorable. Il est impossible de modifier un système commercial après conception pour répondre à de telles contraintes

forme d'onde OFDM, l'autre sur une forme d'onde de type GFSK. Les travaux SESAR auraient dû permettre de répondre à une question essentielle concernant la viabilité d'un tel système radio à bord des avions en coexistence dans les mêmes bandes de fréquences « safety of life » avec le DME, le Mode S, le GNSS, en assurant un bon fonctionnement de celui-ci en présence des interférences générées par les autres systèmes et en ne générant aucune dégradation des performances de ces derniers. Cette évaluation passait par le développement et le test de maquette des deux alternatives (émetteur/récepteur et couche liaison) dans un environnement représentatif d'un avion (i.e. faible découplage entre les antennes de ces divers systèmes). Les tests devaient :

a) Mesurer la dégradation maximale des performances des moyens déjà déployés et vérifier que celles-ci restaient dans les normes de fonctionnement de ces derniers

b) Mesurer les performances du nouveau système en présence des signaux forts des autres systèmes (ceci impliquait des mécanismes de codage robuste de l'information transmise pour pallier à l'inhibition de la réception lors de l'émission des systèmes classiques). L'objectif était de démontrer la faisabilité d'un tel système avec les performances attendues dans un environnement très contraignant sur le plan interférence radio.

Malheureusement cette étape n'a pas pu se dérouler compte tenu de la réticence des partenaires industriels de prendre le risque de s'engager dans un certain développement sans aucune garantie de viabilité.

Le développement des E/R bord LDACS utiliseront la nouvelle approche technologique consistant à utiliser les développements logiciels pour couvrir l'ensemble des couches de télécommunication y compris la couche physique et la forme d'onde. C'est la technologie « Software Defined Radio » largement utilisée par les militaires qui permet une adaptation plus simple en cas de modification des formes d'onde.

Pour pouvoir progresser dans ce domaine, soit certains industriels seront prêts à prendre ce risque, soit il faudra financer ces travaux sur des fonds publics uniquement (c'est-à-dire en dehors du programme SESAR). On peut considérer que pour démontrer la viabilité de la solution LDACS, un budget de 3 à 5 M€ serait suffisant. Ces travaux devraient être financés en partie par le programme SESAR 2020 en s'appuyant sur les travaux en cours au DLR164.

La robustesse du système aux interférences de toutes natures (non intentionnelle ou intentionnelle)

Deux types d'interférences sont à considérer : les interférences générées par le système lui-même (défini comme interférence intra système) et les interférences générées par des systèmes externes (défini comme inter-système).

Les interférences intra-système

C'est une contrainte d'entrée de la phase de conception du système de communication. Le système (ou plus exactement les systèmes de communication) doit atteindre l'ensemble des performances attendues en tenant compte des interférences que le système lui-même peut engendrer.

C'est typiquement le cas pour des systèmes multicanaux pour lesquels l'énergie émise sur un canal déborde également sur les canaux adjacents.

C'est aussi une des contraintes clé pour définir la réutilisation d'un même canal.

Ce sont des paramètres qui peuvent être dimensionnant pour un système de communication.

Un autre aspect important concerne le codage de l'information : plus l'information sera codée plus elle sera robuste vis-à-vis des erreurs de transmission (bits erronés dans un message) grâce à la capacité de

[164] http://www.ldacs.com/contributors/

détecter mais aussi de corriger beaucoup d'erreur. Mais ce codage se fait au détriment de la capacité du système. L'apport du codage n'est vraiment efficace que s'il s'applique également aux échanges de signalisation propres au système.

A noter que parmi les menaces potentielles applicables à tout système de radiocommunication, la menace la plus directe est le déni de service (brouillage intentionnel rendant les échanges air/sol impossibles).

Les interférences inter-systèmes

C'est typiquement le cas des contraintes de cohabitation radioélectrique des systèmes radio sur les avions (Communication, Navigation et Surveillance)

C'est la problématique de la cohabitation à bord de l'avion de nombreux systèmes radio potentiellement capables de se brouiller mutuellement.

Les discussions à l'UIT pour obtenir des allocations spectrales nouvelles pour satisfaire les besoins aéronautiques ont presque toutes échouées. La seule solution a été d'accepter de réutiliser des bandes de fréquences déjà allouées et utilisées pour couvrir les futurs besoins. La seule option encore ouverte serait de viser des portions du spectre non encore trop convoitées plus haut en fréquence, à savoir la bande Ka pour de futures communications par satellite

Ceci conduit donc à envisager demain d'opérer les nouveaux moyens de communication dans un environnement très pollué radio électriquement.

Il n'y a pas beaucoup de mitigation pour ces problèmes compte tenu de la taille d'un aéronef et de l'impossibilité de disposer de séparation géométrique suffisante entre antennes à bord ?

Les contraintes techniques et opérationnelles des communications

Les capacités technologiques pour atteindre les exigences de performance

La fourniture d'un service de communication mobile aux avions est en général associée à un besoin de couverture géographique assez dimensionnant. Cette contrainte opérationnelle a une répercussion directe sur la conception des technologies capables d'y répondre : c'est l'exigence du bilan de liaison.

Un bilan de liaison consiste à déterminer les caractéristiques du signal radio électrique pour garantir une liaison conforme aux exigences de performances. Ce bilan fixe la puissance minimale requise à l'émission pour assurer une réception correcte du signal en limite de couverture et dans les conditions les plus pénalisantes (précipitations, attitude avion affectant la réception...).

Le premier résultat de ce travail sur le bilan de liaison conduit à fixer les portions du spectre capables de respecter le bilan de liaison (i.e. plus les fréquences utilisées seront élevées, plus l'atténuation de propagation sera élevée). Toutes les portions du spectre allouées au service mobile aéronautique ne sont pas nécessairement adaptées aux besoins.

Par exemple dans les travaux OACI, le système AeroMacs envisagé pour les besoins de communications à la surface aéroportuaire doit opérer dans la bande de fréquence 5091 – 5150 MHz. Un système opérant dans cette bande fréquence ne peut pas être utilisé pour les besoins en route (portée de l'ordre de 200 Nm) car cela nécessiterait de mettre en œuvre des puissances d'émission trop fortes pour garantir la non interférence sur les autres systèmes embarqués.

Les contraintes réglementaires de l'Union Internationale des Télécommunications (UIT) en matière d'accès au spectre radioélectrique

Un des enjeux majeurs en matière de nouveaux moyens de communication mobile pour l'aéronautique est l'accès à une portion de spectre protégé et adapté aux exigences opérationnelles du moyen de communication.

La politique de l'UIT en matière d'attribution de bandes de fréquences n'est pas d'attribuer des bandes à des systèmes, mais d'allouer le spectre à des services. Ces services ont été définis au fur et à mesure des besoins. [165]

Chaque service est décrit de manière explicite (i.e. service mobile aéronautique) et certains de ceux-ci sont qualifiés de « Safety of Life ». Dans ce dernier cas les critères d'attribution et de protection du spectre sont plus strict en en général une marge de protection supplémentaire est utilisée (« Safety Margin » de 6 dB).

Dans l'aéronautique tous les besoins de communication liés à la sécurité des vols doivent opérés dans des bandes de fréquences disposant de ce statut « Safety of Life ».

C'est une contrainte forte car la part du spectre réservé au service mobile aéronautique du type « Safety of Life » est très faible en comparaison d'autres services ?

Les bandes de fréquences réservées au service mobile aéronautique

L'aviation civile dispose de peu de ressources en matière spectrale, mais les bandes attribuées le sont à titre Primaire et sur tout l'ensemble du globe, ce qui n'est presque jamais le cas pour les autres services Depuis les 30 dernières années les « dotations » spectrales de l'aviation civile ont été régulièrement réduites au profit d'autres services.

Lors des deux dernières Conférences Mondiales des Radiocommunications[166], l'Aviation Civile a essayé d'obtenir l'accès à de nouvelles portions du spectre pour assurer la disponibilité de cette ressource à longs termes.

Cette démarche n'a pas permis d'obtenir de nouvelles bandes de fréquences mais seulement d'obtenir l'accord des divers participants pour partager les ressources aéronautiques entre les services aéronautiques (i.e. les services de radiocommunications partagent les mêmes bandes avec les services de radio-positionnement ou de radiolocalisation, ce qui correspond aux diverses fonctions CNS). Il faut noter que plusieurs initiatives techniques[167] cherchent à intégrer les fonctions C, N et S dans une même solution technique minimisant ainsi les besoins spectraux.

Dans le domaine des communications aéronautiques mobiles par satellite, la seule avancée a été de garder une porte ouverte pour accéder à une partie du spectre qui lui était associée de manière historique

---

165 Récemment un nouveau service a été défini pour couvrir l'utilisation de moyen radio pour transmettre les informations de contrôle/commande d'éléments embarqué pour à terme réduire la taille et le poids des réseaux filaires à bord de l'avion

166 L'UIT organise ces conférences tous les 3 ou 4 ans de manière à pouvoir répondre aux besoins spectraux des divers services de radiocommunication et pour fixer les règles d'usage ou de partage du spectre entre les divers services. Les deux dernières ont eu lieu en 2012 et 2015, la prochaine devrait avoir lieu en 2019.

167 La solution LDACS proposée par le DLR couvrirait ainsi une fonction nominale de communication mobile mais également une fonction de positionnement par triangulation.

et qui avait été perdue en 2000168. La nouvelle règle établie à la CMR de 2012 considère que si l'OACI confirme un besoin justifié dans cette partie du spectre (légitimation de la justification), les opérateurs privés utilisant cette bande de fréquences devront « considérer » cette demande et « dégager » l'accès à une partie de ce spectre pour satisfaire la demande (partiellement ou totalement). Cette décision est une amélioration de la situation précédente, mais elle ne donne pas la garantie d'accès au spectre dans les années à venir mais ne représente qu'une obligation des acteurs commerciaux de cette partie du spectre (Inmarsat, Turaya,..) de considérer la demande de l'OACI. C'est une obligation de moyens mais pas de résultats.

En résumé, il serait illusoire d'ignorer cette réalité très contraignante : il faudra dans l'avenir faire avec ce que l'on a en matière de spectre radioélectrique sans espérer accéder à de nouvelles portions du spectre.

La compétition pour l'accès au spectre et le faible poids de l'aéronautique

Comme indiqué dans la section précédente, la part du spectre accessible pour les besoins aéronautiques de manière exclusive est relativement réduite. Les évolutions de ces deux dernières décennies ont vu les besoins en allocation spectrale augmenter de manière exponentielle.

C'est particulièrement vrai avec la transformation des méthodes de communication téléphonique vers une mobilité totale. De même la radiodiffusion a subi une forte mutation vers des solutions de type streaming utilisant les réseaux mobiles internet.

La conséquence de ces mutations technologiques et sociétales a été rapidement visible en matière de besoins spectraux.

Dans les discussions au niveau de l'UIT, la faiblesse du camp aéronautique est apparue très rapidement face aux poids lourds du monde des opérateurs télécom grand public.

Malgré une prise de conscience tardive et une meilleure organisation des acteurs aéronautiques, visant entre autres à tenir un discours unifié et cohérent face aux autres communautés, la communauté aéronautique n'a pas pu inverser la tendance de ces dernières années, à savoir **perdre l'allocation de spectre existant est plus probable que d'en gagner**.

La nécessité de partage des ressources spectrales pour satisfaire les divers besoins aéronautiques

Face à cette pénurie spectrale et à l'agressivité des diverses communautés pour garder ou conquérir de nouvelles portions de spectre, l'UIT propose de plus en plus aux acteurs de recourir au partage d'une même ressource en fixant des règles communes garantissant la non interférence mutuelle.

Il faut noter que cette proposition, certes techniquement acceptable, soulève un nouveau risque pour les services « Safety of Life » : le respect des règles établies reste la responsabilité de celui qui s'y engage.

En cas de non-respect de ces règles (ce qui suppose de monitorer objectivement le comportement des services qui partagent le même spectre et de mettre en place une autorité ayant le pouvoir de faire cesser les interférences immédiatement), un mécanisme de restauration doit être défini et mis en œuvre et les conséquences de toutes défaillances de celui-ci doivent avoir été analysées pour définir les mitigations appropriées.

---

168 Lors de la CMR de 2000 le statut de cette bande est passé de AMS(R)S (safety of life) à MSS (Mobile par satellite), avec une note de bas de page indiquant que les communications de sécurité de l'aviation civile auraient la priorité dans l'allocation de cette bande de fréquence. Malheureusement toute cette bande est maintenant utilisée par les opérateurs commerciaux (Inmarsat et Turaya)

Il est donc possible d'envisager l'usage de spectre partagé avec d'autres services[169], mais ce partage induira des contraintes supplémentaires qui pourraient être rédhibitoires pour certaines des applications futures envisagées. C'est sans doute le cas pour les applications d'avion connecté objet de cette analyse.

Les cycles de transition entre systèmes existants et systèmes futurs

Une autre difficulté mise en évidence lors des discussions au niveau de l'UIT c'est le cycle de transition technologique.

La force de l'industrie des radiocommunications mobiles est de toute évidence la capacité à faire évoluer les technologies en phase avec les progrès de la recherche. Pour cette industrie une transition se compte en années, tout en garantissant la compatibilité avec les générations précédentes (téléphones 4G restent compatibles 2G et 3G). Dans le cas de l'aéronautique et des systèmes réglementés, le cycle de transition d'une technologie à une autre se compte plutôt en décennies.

La conséquence directe de cette réalité en matière spectrale, c'est la nécessité d'opérer en parallèle le système existant avec le nouveau système pendant une période de transition qui peut être longue. Ceci conduit à augmenter le besoin spectral durant toute la transition avec comme caractéristique une mauvaise efficacité de l'usage des portions de spectre concernées pendant cette période.

Les besoins et les contraintes des services « Safety of Life »

Le dernier élément contraignant pour les besoins spectraux des radiocommunications mobiles aéronautiques est le processus réglementaire associé aux objectifs de sécurité.

Lors des débats au sein de l'UIT durant les 20 dernières années, l'argument récurrent de la communauté aéronautique a été la sécurité. Pendant quelques années cet argument a été suffisant pour éviter les débats avec les autres communautés.

Avec la croissance exponentielle des besoins en radiocommunication mobile, le simple argument « sécurité » a été écarté au profit d'une notion plus technique conduisant à définir cette exigence de manière simplifiée.

La notion de service « Safety of Life » a donc été consolidé au niveau des travaux techniques de l'UIT. Elle consiste schématiquement à reconnaître le besoin d'une protection additionnelle de ces services vis-à-vis des interférences potentielles des autres services en partage ou opérant dans des bandes de fréquences adjacentes : c'est la « Safety Margin » qui est généralement fixée à 6 dB.

Les contraintes liées à la sûreté des opérations

Indépendamment des aspects interférences abordés dans le chapitre précèdent, la réflexion sur l'avion connecté conduit à identifier une autre forte contrainte : la sûreté (cyber security) des opérations dans un contexte avec des menaces potentielles d'actions intentionnelles.

Les réflexions actuelles concernant les drones

Cette question (i.e. les technologies et les ressources spectrales pour assurer les liaisons de contrôle/commande) est au cœur des travaux en cours sur les drones et au cœur des discussions au sein de l'UIT. Il ne semble pas utile de mener une réflexion spécifique dans le cadre de ce dossier sur cette question puisque les problématiques sont assez proches de celles des drones.

---

169 Cette hypothèse ne concerne pas le cas du système de communication (satellitaire par exemple) qui couvre plusieurs services avec des mécanismes de gestion des priorités pour l'allocation des ressources du système.

Le débat sur l'utilisation de bandes de fréquences « safety of life » pour les liaisons C2 et C3 entre drones et télé-pilote est encore ouvert : la dernière CMR n'a en effet pas tranchée complètement la question, qui de fait est repoussée à la prochaine CMR en 2019.

Il semble néanmoins que le compromis suivant pourrait être finalement approuvé par l'ensemble des acteurs (opérateurs, industriels et autorités nationales et internationales) :

- Utiliser de manière réglementaire les bandes de fréquences « safety of life » pour les drones opérant en espace non ségrégué
- Utilisation de bandes de fréquences non « safety of life » pour les drones opérant en espace ségrégué.

A ce stade il semble donc clair que les exigences applicables au cas de l'avion connecté conduisent à utiliser des bandes de fréquences « safety of life » pour l'ensemble des échanges de données contribuant directement ou indirectement à la sécurité du vol.

En matière de besoin en bande passante et en performances de communication, les analyses des besoins menées dans le contexte des drones en espace non ségrégué peuvent être réutilisées et peuvent donner une première évaluation de ces besoins.

Les limites des solutions technologiques concernant les performances

D'une manière générale, durant les 20 dernières années, les travaux sur les besoins technologiques en matière de radiocommunications mobile aéronautiques se sont heurtés à deux questions essentielles :

1. Comment identifier des besoins opérationnels précis à une échéance temporelle de 20 ans ou plus ?
2. Compte tenu de la longueur du cycle de mise en œuvre d'une nouvelle technologie CNS (définition, développement, validation et déploiement), comment s'assurer que le système final sera conforme aux vrais besoins ?

La réponse pragmatique à ces deux questions est probablement la suivante :

Compte tenu de la durée du cycle technologique observé jusqu'à présent (entre 10 et 25 ans entre la validation d'une technologie et son déploiement à large échelle), la solution consiste à :

a) sélectionner une solution technologique correspondant à l'état de l'art présent respectant les diverses contraintes fixées (comportement déterministe et gestion des ressources de communication en fonction de la priorité des messages),

b) développer la technologie identifiée (ce qui implique en amont de couvrir la standardisation et la réglementation associées)

c) déployer les systèmes progressivement pour disposer d'une infrastructure technique utilisable

d) développer et introduire les applications associées aux concepts futurs en prenant en compte les contraintes techniques et opérationnelles connues de cette nouvelle technologie (performances)

L'idée est donc d'abandonner l'approche classique consistant à d'abord établir les besoins opérationnels (en se projetant 30 ans en avant), car c'est simplement impossible, puis de développer les solutions techniques qui y répondent.

La nouvelle approche consiste à partir de l'état de l'art technologique d'aujourd'hui pour développer des systèmes de communication ayant un comportement déterministe et de les déployer pour disposer d'une infrastructure performante sur laquelle de nouveaux services pourront être fournis.

Ces nouveaux services devront alors prendre en compte les contraintes de l'infrastructure déployée et s'y adapter. Il faudra également accepter que cette infrastructure devienne « ringarde » lorsque son utilisation aura été généralisée.

Les pistes raisonnables

Intégrer les contraintes des systèmes de communication pour consolider un objectif final atteignable

Compte tenu de ce qui a été développé précédemment, la démarche technique appropriée pour développer les moyens de communication nécessaires pour permettre d'opérer des avions connectés, consiste à inverser la démarche traditionnelle et logique en développant d'abord une technologie s'appuyant sur l'état de l'art actuel de l'industrie des communications radio mobiles.

Cette technologie doit intégrer un comportement déterministe pour garantir les performances des applications les plus critiques.

Elle doit également intégrer des mécanismes de gestion dynamique des ressources de manière à pouvoir garantir différents niveaux de qualité de service associés à des priorités.

Ces deux fonctionnalités sont essentielles pour pouvoir assurer les niveaux de sécurité associés aux besoins des avions connectés.

Pour garantir une disponibilité élevée, il sera sans doute nécessaire de redonder cette liaison et probablement de manière différenciée pour éviter des modes communs de défaillance (deux liens dans des bandes de fréquences distinctes par exemple comme cela est envisagé dans les travaux SESAR).

La problématique n'est pas en premier lieu celle du débit du canal radio, mais plutôt celle des contraintes associées aux bandes de fréquences utilisables pour ce type de service (en particulier la sûreté de fonctionnement en présence d'autres systèmes radio à bord d'un même avion, chacun d'eux contribuant aussi à la sécurité du vol).

Sécuriser les rares portions du spectre utilisable pour satisfaire ces futurs besoins

Comme nous l'avons vu plus avant la question la plus épineuse est l'accès au spectre radioélectrique en fonction des contraintes réglementaires applicables qui à priori restreindront le spectre utilisable aux bandes de fréquences aéronautiques protégées (« safety of life »). Ces bandes sont déjà fortement utilisées et ne disposent pas de beaucoup de capacité compte tenu des systèmes opérant déjà dans ces bandes.

Une des possibilités est donc de gérer ces bandes de fréquences « safety of life » avec la perspective de rationaliser l'usage de ces bandes pour dégager une partie pour ces futurs besoins. C'est cette démarche qui est actuellement appliquée pour la bande VHF avec une migration quasi complète des canaux de 25 à 8,33 kHz d'ici 2020/2025. Cette migration dégagera de la capacité supplémentaire pour ces systèmes mais aussi libérera une partie de ce spectre pour d'autres besoins « safety of life »

L'accès à de nouvelles ressources spectrales pouvant avoir le statut « safety of life » comme nous l'avons montré précédemment est quasi fermé sauf à viser des allocations en bande Ka pour privilégier des solutions satellitaires (néanmoins les bilans de liaison dans ces bandes de fréquences deviennent très contraignants et imposeront des dispositifs antennaires directifs et actifs).

La troisième piste est d'ordre réglementaire : modifier les conditions réglementaires et le cadre opérationnel obligeant d'opérer dans des bandes « safety of life » pour certaines fonctions associées à la sécurité des vols. Une telle démarche est complexe et longue car elle remet en cause fondamentalement les principes de base appliqués dans les processus de certification. Mais ce n'est pas une piste aujourd'hui fermée même si la probabilité de succès reste à ce jour plutôt faible.

Elaborer un scenario de transition réaliste

Enfin la dernière contrainte associée aux moyens de radio communication c'est la manière dont ces nouveaux moyens et services associés seront déployés.

La transition, dans le domaine aéronautique et plus particulièrement dans le domaine de l'Air Traffic Management, reste une phase délicate, car elle dure en général assez longtemps. Ceci induit donc des besoins parallèles qui non seulement impactent le résultat des études coût/bénéfice mais qui également génèrent des contraintes en termes d'utilisation spectrale.

Comme nous l'avons vu ces dernières contraintes sont assez sévères et ne permettent pas pour le moment de garantir la faisabilité d'une transition acceptable.

Il est donc urgent, en parallèle des études technologiques et réglementaires de réfléchir sur un scénario de transition réaliste (ciblant une durée de transition de l'ordre de 15 années) qui puisse s'accommoder des contraintes diverses associées et en particulier des aspects spectraux.

A ce stade force est de constater qu'un tel scénario de transition n'existe pas.

Conclusions et recommandations

Les sections précédentes ont souligné les enjeux techniques, réglementaires et opérationnels associés aux moyens de communications mobiles nécessaires pour opérer un avion connecté.

Ces divers enjeux conduisent à proposer un certain nombre de thèmes de recherche pour affiner les besoins et les solutions et un certain nombre d'actions permettant la préparation d'un cadre réglementaire adapté à ces nouvelles opérations.

Les actions de recherche proposées sont les suivantes :

a) Préciser le concept d'opération de l'avion connecté pour pouvoir affiner les besoins en matière d'échange de données air/sol en complément des besoins d'échange identifiés par le programme SESAR. Ces besoins doivent permettre d'identifier le niveau de performance requis pour le ou les systèmes de communication ainsi que les capacités de transmission requises pour chaque niveau de performance.
Ces besoins peuvent se décliner sous deux catégories :

- les besoins d'échanges continus et permanents avec l'ensemble des avions connectés
- les besoins d'échanges ponctuels liés aux interventions du télé-pilote

b) Définir de manière plus précise les rôles et responsabilité des divers acteurs impliqués dans les opérations d'avions connectés.
En complément des acteurs traditionnels (service de contrôle aérien, équipage de conduite à bord, centre d'opération compagnie...) définir les rôles et responsabilité du ou des fournisseurs de liens de communication mobile (dans le cas de plusieurs opérateurs pour un même vol comment se gère le « handover » entre eux ?)

Les actions réglementaires suggérées sont les suivantes :

a) Poursuivre activement le lobbying au sein de l'UIT pour dégager de nouvelles allocations spectrales pour les communications aéronautiques avec les niveaux de protection réglementaires suffisant pour couvrir ces missions d'avion connecté

b) Définir les exigences réglementaires associées au mode d'exploitation par télé-pilote et en déduire les exigences réglementaires associées aux fournisseurs de service télécommunication (à la fois en termes de performances à tenir mais également de responsabilités juridiques et contractuelles vis-à-vis de l'exploitant aérien).

Annexe : Evaluation préliminaire des échanges de données air/sol associés au concept avion connecté

Deux flux de données sont à distinguer :

Le flux nominal et permanent : Les échanges continus concernant l'ensemble des avions opérant dans le mode « avion connecté », ce mode concerne tous les « avions connectés ». C'est de loin le flux le plus dimensionnant mais qui n'a pas d'exigences de performances très élevées.

Le flux de « remote control » : Les échanges spécifiques liés à une reprise de contrôle de l'avion par le « télé-pilote » en cas de situation non nominale, ce mode ne concerne qu'une faible proportion des « avions connectés ». C'est un flux plus faible mais qui demande des performances plus élevées.

Le mode nominal consiste à renvoyer au sol (« télé-pilote » et systèmes associés) :

- les informations du contexte actuel du vol (recopie des écrans ND et PFD), y compris la trajectoire planifiée
- les informations associées à la surveillance physiologique du pilote à bord
- toutes autres informations jugées utiles pour rendre le concept plus robuste

Le mode « remote control » consiste à renvoyer/échanger avec le sol les informations complémentaires suivantes :

- La vidéo du cockpit
- Les commandes de prise de contrôle de l'avion depuis le sol (similaire au cas du drone)
- Le relais des échanges avec l'ATC (le concept propose une option de liaison directe entre le télé-pilote et l'ATC ne passant plus par l'avion lui-même mais pour le dimensionnement du système de communication il est prudent de conserver ce flux).

Le tableau suivant regroupe les estimations actuelles par avion des flux nominaux et non-nominaux

Nature des échanges	**Flux nominal (kbps)**		**Flux non nominal (kbps)** (non cumulatif avec le flux nominal)	
	Downlink	Uplink	Downlink	Uplink
Contexte du vol	10	1	10	1
Physiologie équipage	5	5	5	5
Eléments stratégiques du vol	5	1	5	1
Contrôle commande	5[170]	3	10	10
Routage échanges ATC	5[171]	5	10	10
Vidéo	100		500	
Total	130	15	540	27
Maximum downlink	540	kbps/avion		
Maximum Uplink	27	kbps/avion		

Pour l'espace européen avec 2500 avions à gérer simultanément ceci conduit à :

- le mode nominal pour l'espace européen conduit à un flux agrégé de 325 Mbps (en mode downlink beaucoup plus dimensionnant).

170 En mode nominal il ne devrait pas y avoir de contrôle/commande du sol sauf pendant la phase de transfert d'autorité du pilote à bord vers le pilote au sol.

171 Ces échanges n'ont pas vocation à partager les mêmes moyens de communication : ils sont mentionnés dans ce tableau pour mémoire et ne représentent pas la partie dimensionnant en termes de quantité d'information

- Le mode non nominal avec un maximum de 25 avions simultanément en ce mode conduit à un flux complémentaire de l'ordre 13 Mbps ce qui reste négligeable par rapport à la charge nominale (Considérant la situation non nominale avec une probabilité de $<10^{-2}$ par vol).

Cette première évaluation ne s'intéresse qu'à dimensionner les flux globaux pour un exemple régional, sans se poser la question de l'architecture des systèmes sous-jacents (un seul système de communication ou plusieurs systèmes de communication distribués sur une région). Par ailleurs la criticité des échanges est très différente selon le mode et même au sein du mode non nominal les flux ont des objectifs assez différents donnant lieu à des exigences différentes qu'il conviendra de définir dans le cadre de la maturation du concept.

Pour aller plus loin il est clair que tous ces flux ont besoin d'être caractérisés de manière précise en termes de débit et de performances (latence, disponibilité...). Au-delà de ce travail, le sujet majeur sera de définir la nature des infrastructures nécessaires et des opérateurs associés à ces infrastructures. Il est clair qu'il y aura plusieurs infrastructures pour assurer ces nouveaux services (le concept aujourd'hui identifie des infrastructures spécifiques pour les besoins terminaux (atterrissage en mode non nominal avec une infrastructure locale). La multiplication des infrastructures conduit naturellement à un accroissement de la capacité nécessaire au service par rapport à un système unique.

Le choix de la zone Europe est fait pour se placer dans un contexte qui nous est plus proche.

Les valeurs figurant au tableau doivent être considérées comme représentant une charge moyenne de communication, ce qui peut signifier que la charge instantanée pour le système de communication soit beaucoup plus importante (nous ne sommes pas en présence de communications uniformément distribuées). Les scénarios de variation instantanée de la charge du système de communication devront être développés pour modéliser de manière plus fine la demande en communication et les performances des échanges associés (latence, disponibilité...) aux cas les plus dimensionnant (« worst case approach »).

LA METEOROLOGIE AERONAUTIQUE

Patrick DUJARDIN (Expert invité)

Au cours du colloque « Trafic aérien et météorologie » tenu en novembre 2010, le commentaire suivant introduisait la session 3 : *« Si la question de l'importance de la météorologie concernant les phénomènes dangereux aussi bien près des aéroports qu'en route est une problématique abordée depuis bien longtemps, le thème du rôle des données météorologiques dans la gestion des séparations par le système ATM n'a pris une importance véritable que depuis quelques années. C'est la raison pour laquelle ce thème fait l'objet d'une session complète.*

Cette question est abordée par les organismes de gestion du trafic aérien selon deux angles

- importance de la connaissance précise du vent prévu pour effectuer une prédiction de trajectoire de qualité permettant d'anticiper les prévisions de risques de pertes de séparations entre avions,

- anticipation de la connaissance des conditions de vols défavorables susceptibles de conduire les pilotes à des modifications de trajectoires, modifications rendant difficile la gestion des séparations par le contrôle aérien ».

Concernant les phénomènes dangereux, le Directeur du Bureau d'enquêtes et d'analyses soulignait que :

« On peut dire aujourd'hui que, dans les enquêtes en cours du Bureau Enquêtes Analyses sur des accidents de transport public, on considère qu'il y a un facteur météo significatif dans pratiquement la moitié des accidents ».

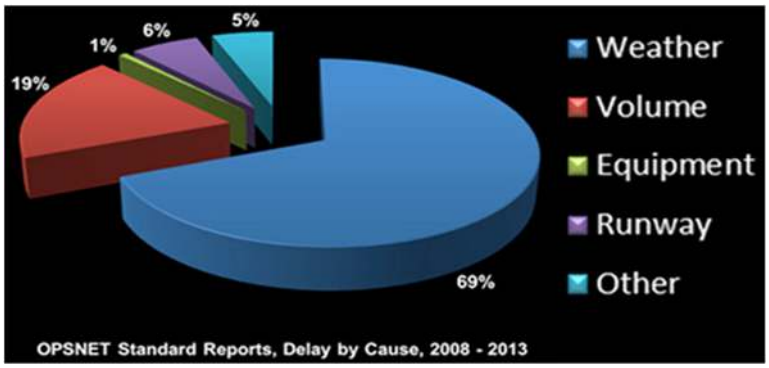
Ce sont un certain nombre de travaux menés depuis, en Europe, notamment dans le cadre de SESAR, et aux USA, notamment dans le cadre de NextGen, qui sont présentés ici.

La FAA met en avant l'importance de la connaissance de l'information météorologique :

"The NextGen Weather Program is a critical part of NextGen as it helps reduce the impact of weather on aviation, resulting in safer, more efficient and predictable day-to-day National Airspace System (NAS) operations".

L'importance du facteur et la part des conditions météorologiques dans les délais imposés au trafic dans l'espace américain explique cet intérêt (Cf. fig 1)

fig 1 - Causes of air traffic delay in the National Airspace System (source FAA)



De même en Europe, une analyse réalisée en 2010 par Eurocontrol montre que les conditions météorologiques sont à l'origine de 13,5 % des retards en route et 64,4 % des retards sur aéroport (Paris-CDG) en période hivernale (35% en été).

A ces deux catégories d'impact de la météorologie sur le transport aérien correspondent deux grandes classes de services, en *conditions météorologiques nominales* et en *conditions significatives*.

En conditions nominales, le paramètre le plus important est la composante horizontale du vent. Au deuxième ordre, les paramètres température et humidité ont un impact notable sur la consommation de carburant.

Les conditions significatives recouvrent de nombreux phénomènes météorologiques, tels que la convection orageuse (turbulence sévère, impact de grêle, givrage et fortes concentrations de cristaux dans les systèmes convectifs tropicaux à l'origine d'extinction moteur et de dysfonctionnement des sondes de vitesse et température), les conditions givrantes, la turbulence de ciel clair, les cendres volcaniques...

Près du sol, à proximité d'un aéroport, d'autres conditions adverses peuvent affecter les opérations, tels que le cisaillement de vent, les courants descendants intenses et la visibilité.

Enfin, sur la plateforme, entrent aussi en considération neige, fortes pluies et verglas qui affectent le roulage et le brouillard qui ralentit considérablement les mouvements au sol.

Tous ces phénomènes météorologiques sont désignés par le terme de conditions adverses.

L'incertitude de l'information météorologique dans les situations peu prévisibles (fort gradient de vent horizontal par exemple), peut être vue comme une condition significative sans être en soi une condition adverse, ne perturbant que la planification des mouvements.

Concernant l'horizon de prévision, les exigences de l'aviation sont surtout focalisées sur le court terme (de l'ordre de 3 heures) et moyen termes (jusqu'à 24 heures).

Les progrès de la science météorologique

Un aspect primordial est le caractère chaotique de l'atmosphère qui explique la non prévisibilité de certains phénomènes météorologiques. Aucun modèle d'erreur n'est valable la totalité du temps, et pour des cas à fort impact, qui par ailleurs sont rares, la notion de borne d'erreur n'est pas judicieuse.

Des prévisions seront donc possibles, avec un bon niveau de fiabilité et de précision en conditions nominales tandis qu'en conditions significatives la prévisibilité est dégradée ; toutefois l'occurrence de ces conditions est bien prévue.

Les satellites qui fournissent une observation globale de l'atmosphère et les supercalculateurs, avec lesquels il devient possible de simuler numériquement son évolution ont largement contribué aux progrès de la science météorologique.

Des radiomètres imageurs offrent une vision continue à haute résolution temporelle jusqu'aux latitudes moyennes. Des instruments actifs, lidar, radar, sont maintenant capables de traverser les couches de l'atmosphère pour en caractériser le profil vertical. Pour ce qui concerne la simulation numérique, la puissance de calcul a doublé tous les 18 mois.

L'observation de l'atmosphère s'est ainsi considérablement améliorée et les modèles globaux de prévision ont pu affiner leur résolution spatiale et, par conséquent, leur horizon de prévision.

Les modèles numériques, cependant, ne sont pas capables de fournir des prévisions aux très courtes échéances parce qu'il leur faut un certain temps pour atteindre l'équilibre après assimilation des

observations ; c'est pour combler cette fenêtre d'environ 6 heures que de très gros efforts de R&D ont été consentis pour développer une prévision immédiate (ou nowcasting).

Cette nouvelle capacité des services météorologiques à couvrir sans discontinuité de l'instant présent à la longue échéance, avec des résolutions spatiales et temporelles qui se dilatent avec l'horizon de prévision répond aux exigences de l'aviation.

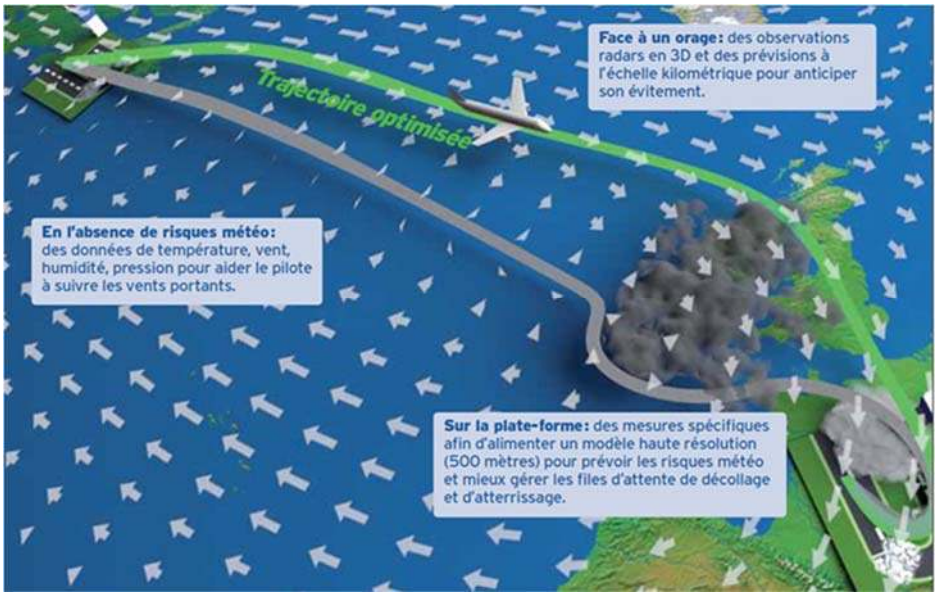
Les programmes spécifiques pour la météorologie aéronautique

SESAR en Europe et NEXTGEN aux Etats-Unis visent un renforcement de la sécurité des vols, une amélioration de la performance, une réduction des coûts et de l'impact environnemental des vols.

Un élément clé est la trajectoire 4D (dans l'espace et le temps) partagée entre les pilotes à bord, les centres d'opérations des compagnies et les organismes de contrôle. Les différences significatives entre trajectoires prévues et réalisées limitent la prévision des conflits en vol, obligent à augmenter les distances de séparation entre avions réduisant ainsi la capacité en route et en approche.

Au niveau de précision visé, l'incertitude de la prévision météorologique devient un facteur déterminant, tant en conditions nominales par les écarts qu'elle induit le long de la trajectoire prévue, qu'en conditions significatives lorsqu'un pilote est obligé de s'écarter de la trajectoire prévue pour éviter un risque météorologique.

Figure 2 : Le support météorologique à la trajectoire 4D (source Météo-France)



Intégration de l'information météorologique dans les systèmes de la navigation aérienne

L'intégration de l'information météorologique dans les systèmes de la navigation aérienne peut se faire à différents niveaux depuis la simple livraison sur des supports analogiques, la décision reposant sur la seule expertise humaine jusqu'à la traduction de l'information météorologique en impacts suivi d'une analyse par un système qui proposera des solutions optimales à l'opérateur. Entre ces deux extrêmes, une analyse automatique peut permettre une présentation de l'information météorologique attirant

l'attention de l'opérateur lorsque certains seuils opérationnels sont dépassés ou la traduction de cette information en impact (par exemple la prévision de réduction de capacité d'un aéroport due au brouillard).

Des outils reposant sur différents niveaux d'intégration peuvent cohabiter ; c'est ainsi que dans NextGen, le NWP (NextGen Weather Processor) permet notamment :

- grâce au AWD (Aviation Weather Display) d'avoir « d'un coup d'œil » une vue cohérente de la situation météorologique adaptée aux opérateurs en route ou en zone terminale,
- d'ajouter à cette présentation des éléments d'analyse et de prévision à court terme spécifiques des exigences aéronautiques,
- de traduire la vue météorologique en contraintes intégrables dans la prise de décision.

La première contrainte imposée par l'intégration dans les systèmes concerne donc le format de l'information météorologique. Il s'agit donc de distribuer l'information météorologique sous forme interopérable : de nouveaux standards (XML, WXXM) se mettent en place qui deviendront réglementaires dans les prochaines années.

Le partage des informations repose sur leur échange à travers le réseau SWIM.

Dans le monde aéronautique, les systèmes d'aide à la décision simulent des processus déterministes dont les erreurs sont modélisables. On l'a vu, ce n'est pas le cas de l'atmosphère dont le comportement est parfois chaotique.

La réponse à cette difficulté est la technique dite de prévision d'ensemble qui consiste à réaliser, non pas une, mais plusieurs prévisions en modifiant légèrement les conditions initiales ou des paramètres critiques du modèle. Quand le futur est prévisible, tous les membres de la prévision convergent. S'ils divergent, il devient possible de quantifier l'incertitude de manière dynamique en chaque point et pour chaque horizon de prévision.

Cette technique constitue une rupture majeure dans le processus d'intégration de l'information météorologique dans les systèmes d'aide à la décision. Cela implique aussi que l'information puisse être traitée par un système alors qu'elle est aujourd'hui principalement analysée par des acteurs humains.

Un exemple, le risque lié à la convection

La convection, pour son impact sur la circulation aérienne, en termes de capacité, performance, ponctualité mais aussi de sécurité, est une illustration de la façon dont les nouveaux services météorologiques pourront aider à augmenter la capacité tout en renforçant la sécurité.

La convection est aussi emblématique parce que sa prévisibilité est très réduite. De fait, il n'est pas possible aujourd'hui, même avec l'appui d'un système d'observation très sophistiqué (radar, lidar, satellite) de prévoir au-delà de quelques minutes le développement explosif d'un Cumulo-Nimbus (Cb) ou sa dissipation. En revanche, la prévision de conditions instables qui vont favoriser la formation de Cb est possible, avec de bons résultats, jusqu'à un horizon de 7 jours.

Les exigences des utilisateurs se relâchent aussi avec l'horizon de prévision :

- dans la phase d'exécution (avec un préavis de quelques minutes), le pilote et le contrôleur au sol doivent connaitre précisément l'étendue spatiale (résolution kilométrique), la sévérité et l'altitude sommitale de chaque nuage convectif susceptible d'impacter un secteur de contrôle ;

- à court terme, la connaissance des risques qu'un secteur de contrôle soit impacté, permet d'armer les positions de contrôle et/ou de poser des régulations du trafic afin que la situation reste gérable ;

- enfin avec une planification à moyen terme, un gestionnaire de réseau peut utiliser une information plus grossière en terme de résolution spatiale (25 km) pour anticiper quels sont les secteurs susceptibles d'être impactés le lendemain et éventuellement proposer des routes alternatives pour les désengorger. C'est par une combinaison des nouveaux services météorologiques qu'il sera possible de satisfaire ces exigences de manière cohérente de l'exécution au moyen terme.

On trouvera en annexe, des liens vers des pages SESAR, NEXTGEN et Météo-France qui détaillent les solutions techniques mises en œuvre pour obtenir ces services.

Objectif de déploiement dans le cadre du Ciel Unique Européen

Le Ciel Unique Européen vise l'objectif ambitieux d'un déploiement progressif entre 2016 et 2030 des nouveaux concepts opérationnels développés dans le cadre de SESAR.

Dans le premier programme cadre (2011-2016), l'effort des services météorologiques qui constituent le consortium Eumetnet dans Sesar (France, Allemagne, Royaume-Uni, Pays-Bas, Suède, Finlande et Norvège) a porté sur l'harmonisation et la consolidation des services météorologiques au niveau européen, la promotion auprès des utilisateurs des nouveaux services innovants et la collecte de leurs exigences, le développement de prototypes des systèmes de consolidation et de traduction de l'information générique pour satisfaire ces exigences et la participation à des exercices de validation des nouveaux concepts opérationnels de navigation les plus matures.

L'étape suivante qui vient de débuter consiste donc pour les acteurs météorologiques à industrialiser les premiers services innovants. Parmi ceux-ci on notera :

- un service d'informations sur la convection (2D et 3D) établies à partir des données issues du réseau radar européen,

- un service harmonisé au niveau européen de prévision des risques de :

  . turbulence en ciel clair, qui bénéficiera des observations avion, qu'elles soient automatiques ou fournies par l'équipage,

  . givrage,

  . convection

  . et pour les aéroports de l'ensemble des paramètres de « winter weather » tels que la neige

- un portail d'accès aux données météo (Tailored MET information for ATM) accessible via le SWIM, MET-GATE/SWIM.

Dans le même temps, débutera le déploiement opérationnel des nouveaux concepts dès lors qu'ils auront été validés. A terme, et même s'il n'est pas envisageable de supprimer les mauvaises conditions météorologiques, celles-ci seront mieux anticipées et des procédures de remédiation permettront d'en minimiser les impacts. On peut ainsi prévoir que sur les 10 prochaines années, le support de la météorologie à l'aviation connaitra une mutation profonde, clef du succès de l'entreprise Ciel Unique Européen.

Un effort de recherche à poursuivre

De façon générale, la recherche amont dans les domaines de la physique de l'atmosphère et de la météorologie est menée globalement sans préjuger du domaine d'application, comme c'est le cas par

exemple pour la prévision de la tombée ou la levée du brouillard. La caractéristique des programmes Sesar et NextGen a été de financer des projets spécifiquement destinés à la météorologie aéronautique. Cet effort a permis de progresser que ce soit en conditions météorologiques nominales et en conditions significatives. Il conviendra de poursuivre cet effort pour faire profiter le domaine aéronautique des progrès attendus, qu'il s'agisse d'instrumentation (par exemple le Lidar, light detection and ranging, la prise en compte de nouvelles données satellites, …), de modélisation (avec une maille plus fine) ou de techniques de prévision (par exemple en ce qui concerne la prévision immédiate ou nowcasting ou le développement d'un modèle statistique de prévision du givrage des avions au sol, à partir de l'expertise des prévisionnistes aéro, pour transmission aux cellules CDM sur les aéroports).

Dans le livret 8 sont présentés certains axes de recherche déjà en cours ou dont le lancement est envisagé. Seront également identifiés les phénomènes météorologiques dangereux non détectables à bord aujourd'hui et dans un avenir proche.

Et des questions en suspens

Si les travaux menés récemment ont permis aux organismes météorologiques de faire des progrès sensibles dans l'élaboration des informations destinées à l'aéronautique, le rôle de chaque acteur, services météorologiques, centres d'opérations des compagnies aériennes et organismes de gestion du trafic aérien, est à préciser.

La disponibilité de l'information sera assurée grâce à SWIM, la capacité d'utiliser les nouvelles possibilités de prévisions dans des outils d'aide à la décision semble acquise, mais la responsabilité de cette utilisation n'est pas identifiée, en particulier en Europe.

Il reste donc là un espace d'études à mener pour tirer réellement parti des progrès scientifiques et techniques réalisés. En effet, si l'on se place à l'horizon 2050, il est nécessaire d'avoir défini les conditions nécessaires pour que le système d'aide à la décision destiné aux opérateurs des CCO des compagnies aériennes évolue vers un système qui transmette automatiquement (dans un premier temps après vérification ?) aux automatismes bord une nouvelle trajectoire prenant en compte les phénomènes météorologiques.

Annexe : Acronymes et Références

Liste des Acronymes

AOC : *Airline Operation Centre*. Centre de coordination des opérations d'une compagnie aérienne.

ASPOC : *Application de Signalisation et Prévision des Orages pour le Contrôle aérien*. Service spécifique fourni par Météo-France à la DSNA pour informer du risque convection sur le territoire français.

ATC : Air Traffic Control. Centre de contrôle de la navigation aérienne

Cb : *Cumulo-nimbus*.

CDG : *Aéroport de Paris-Charles de Gaulle*.

CDM : *Collaborative Decision Making*. Processus de décision collaborative entre tous les acteurs opérationnels d'un aéroport pour améliorer l'efficacité des opérations.

CUE : *Ciel Unique Européen*. Les règlements du Ciel Unique Européen ont instauré des règles de gestion communes du trafic aérien dans l'Union européenne.

DWD : *Deutscher Wetterdienst*. Service météorologique allemand.

Eumetnet : Le groupement d'intérêt économique européen Eumetnet offre aux services météorologiques une plateforme de travail collaboratif et leur permet de communiquer d'une seule voix avec la Commission Européenne et ses diverses agences.

Metar : *METeorological Aerodrome Report*. Message d'observation météorologique pour l'aéroport.

Nextgen : *Next Generation Air Transportation System.* Nouveau système de gestion du trafic aérien des États-Unis en cours de développement qui doit remplacer le National Airspace System et sera déployé dans le pays entre 2012 et 2025. NextGen doit permettre de supprimer les problèmes de capacité du système actuel qui a du mal à faire face à la croissance du trafic intérieur.

NWP : NextGen Weather Processor

PIC : Pilot In Command : Pilote aux commandes pendant le vol.

R&D : *Recherche et Développement*

Sesar : *Single European Sky ATM Research*. Programme visant à fournir à l'Europe des systèmes performants de gestion du trafic aérien afin de moderniser les systèmes actuels. Le programme SESAR est le pilier technologique du CUE

Sigmet : *SIGnificant METeorological Information*. Message destiné aux aéronefs en vol signalant des phénomènes météorologiques très dangereux et organisés observés et/ou prévus.

SWIM : *System Wide Information Management*. Réseau de communication orienté services et sécurisé entre tous les acteurs de la navigation aérienne en Europe.

Taf : *Terminal Aerodrome Forecast*. Prévision météorologique aéronautique pour l'aéroport.

4DWxCube : L'ensemble des systèmes qui réaliseront la consolidation européenne de l'information météorologique générique produite par les services nationaux, sa traduction en information dédiée pour l'aviation et sa dissémination via un portail unique vers les utilisateurs

3D, 4D : Tridimensionnel, quadridimensionnel

Sources

- documents Académie de l'Air et de l'Espace

[Réf 1] Dossier n°35 de l'Académie de l'air et de l'espace - Trafic aérien et météorologie (juin 2012)

- documents Météo-France

[Ref 2] http://www.meteofrance.fr/documents/10192/18008/26573-48.pdf/

- documents SESAR

http://www.sesarju.eu/

http://www.sesarinnovationdays.eu/

http://www.sesarinnovationdays.eu/files/2015/Papers/SIDs_2015_paper_24.pdf

http://www.sesarju.eu/node/2493

http://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/concepts/Fact_sheet_on_METGATE.pdf

- documents NextGen

https://www.faa.gov/nextgen/

http://www.faa.gov/nextgen/programs/weather/

LES BESOINS EN FORMATION POUR LES OPERATIONS FUTURES

Philippe CREBASSA (Expert invité)

Contexte

Au regard de l'évolution des capacités technologiques, les rôles et les compétences des femmes et des hommes qui utiliseront les futurs systèmes seront cruciaux pour mener à bien la transition vers un nouveau paradigme et son maintien dans un état stable et performant.

L'agent humain, qu'il soit utilisateur, gestionnaire, agent de maintenance, sera le lien entre le système technique et son environnement opérationnel, économique et social. C'est bien l'homme qui donnera au système plus automatique sa place dans le monde du transport aérien et de l'économie mondiale.

Quel sera donc ce contexte dans lequel des avions plus automatiques seront exploités en 2050 ?

Depuis 40 ans, le trafic aérien double tous les 15 ans et toutes les prévisions s'accordent sur une croissance semblable pour les 15 prochaines années. L'activité pourrait donc avoir triplé ou quadruplé d'ici 2050. Ce rythme très soutenu, le volume tout à fait considérable (déjà 3 milliards de passagers transportés en 2015, autour de 10 milliards en 2050) finira de démocratiser le transport aérien à l'échelle mondiale. D'un moyen de déplacement réservé aux plus aisés jusque dans les années 50, l'aviation sera entrée dans une nouvelle ère, celle du transport de masse.

Ce développement concernera surtout les régions du monde émergentes ou peu développées. Il y a 10 ans, l'Amérique du Nord et l'Europe représentaient 60% du trafic aérien mondial. Aujourd'hui, le reste du monde fait part égale avec ces deux régions. Dans 20 ans, la répartition aura fini de s'inverser, l'Amérique du Nord et l'Europe générant 40% du trafic total. Ainsi, en 2050, le transport aérien de masse sera devenu réalité dans toutes les régions du monde, au-delà des zones les plus matures.

Cette situation aura plusieurs conséquences notables. Les exigences en matière de sécurité, d'efficacité économique et de protection de l'environnement iront croissant au moins au même rythme que l'activité elle-même. Le transport aérien se devra de rester exemplaire sur ces enjeux mais aussi de répondre aux nouvelles attentes des populations. Touchant toutes les populations et toutes les catégories, dans la diversité de leurs dimensions sociales et culturelles, le transport aérien sera particulièrement exposé à l'acceptabilité des voyageurs et des populations survolées.

S'ajoutera à cette complexité démultipliée une autre complexité, plus spécifique à l'activité aérienne. En 2050, les drones seront un vecteur majeur de l'économie et occuperont une place à part entière dans l'espace aérien. La mixité du trafic, comme celle générée par les avions équipés de systèmes différents (avions plus ou moins automatiques par exemple), vont complexifier les enjeux et la maîtrise d'un état stable.

Ces exigences résultantes s'imposeront naturellement aux infrastructures et aux systèmes techniques, qui devront être déployés en nombre et en qualité, mais également sur les femmes et les hommes qui les exploiteront.

Quelles compétences pour le pilote ?

Depuis plus de cent ans, l'avion et les systèmes embarqués n'ont cessé d'évoluer pour gagner en sécurité et en efficacité. Au temps des pionniers, il s'agissait uniquement de faire voler l'appareil. Les ressources du pilote étaient focalisées sur le maintien dans l'enveloppe de vol pour en garantir la sécurité. Les premiers changements majeurs dans les capacités du système sont apparus avec le pilote automatique, puis les commandes électriques et le FMS dans les années 80 (voir livret 2). Ces trois sauts techniques et fonctionnels ont permis au pilote d'utiliser aussi ses capacités cognitives pour une mission plus orientée sur l'efficacité, c'est-à-dire la gestion du vol. Le pilote assurait dorénavant ces deux missions, faire voler l'avion et gérer le vol. L'apparition du TCAS dans les années 90 et les travaux de recherche dérivés sur l'auto-séparation autonome induiront à nouveau une évolution dans les responsabilités du pilote, l'avion devenant plus autonome dans la conduite du vol vis-à-vis du contrôle aérien au sol.

Au fil de ces changements touchant ses responsabilités, le métier et les compétences du pilote ont toujours évolué. Ces compétences s'enrichissant par la pluralité des comportements et des actions à maîtriser, la formation des pilotes a progressivement laissé l'apprentissage uniquement fondé sur les connaissances pour se concentrer sur les compétences elles-mêmes.

Quand l'avion sera plus automatique, voire tout automatique, l'équipe, composée de pilotes au sol ou à bord, d'opérateurs, devra assurer une mission (voir livret 4), à l'instar des centres de commande qui réalisent les missions spatiales. Le parallèle trouve vite ses limites, notamment par la variabilité des conditions temps réel dans un vol de passagers, mais il s'agira bien pour une équipe d'exécuter un scénario et d'atteindre les objectifs avec une machine plus ou moins exploitée à distance.

La formation est souvent abordée très tard dans les changements, une fois les phases de concept opérationnel, des expérimentations et de développement du système achevées. Pourtant la formation a elle-même un cycle long, investissant sur l'avenir pour former les jeunes générations ou transformer les compétences des professionnels déjà aguerris. Aujourd'hui, il ne faut pas moins de deux ans pour amener un jeune cadet de zéro aux privilèges de copilote en compagnie aérienne. S'agissant d'une évolution aussi importante que celle d'un avion plus automatique, l'industrie devra certainement construire un plan de transition robuste, en particulier pour mettre en œuvre les plans de formation appropriés et laisser un temps suffisant pour des retours d'expérience fiables.

Pour cela, il faudra donc anticiper et définir d'abord précisément les responsabilités, les rôles et les tâches des différents acteurs (voir livrets 4 et 5) : pilote sans copilote, équipe au sol (télé pilote, opérateurs systèmes…). C'est une condition préalable à la construction des programmes de formation.

Pour ces programmes, la définition des compétences de pilotage et la pédagogie pour acquérir ces compétences seront un défi majeur. La partie dite pratique de la formation pilote de ligne ab-initio se déroule aujourd'hui pour ses 2/3 au sol. Dans une perspective d'avion plus automatique, que restera-t-il des compétences des pionniers ? L'accidentologie de la dernière décennie montre l'importance pour le pilote de conserver le sens de l'air et du vol. La conduite dynamique d'une trajectoire à 3 dimensions exige des qualités physiques et mentales spécifiques concentrées en une seule expression : être un aviateur. Cela ne saurait manquer à un opérateur en charge directe d'un avion. Cette exigence revêtira d'autant plus d'importance lorsque l'avion sera piloté ou contrôlé du sol. On ne pourrait en effet admettre que l'évolution prévisible induise des risques opérationnels supérieurs au niveau actuel. La formation, à travers le monde, devra tenir compte de cet aspect. Il n'est pas inutile de rappeler que l'évolution de la formation et de la sélection des acteurs opérationnels a toujours été fonction de paramètres financiers au même titre que les paramètres techniques et pédagogiques, amenant à adopter mondialement des programmes directement fonction des exigences minimales définies par les autorités réglementaires.

Un autre défi concernera le juste niveau de connaissance et de maîtrise du système. Le futur pilote ne doit-il être qu'un pur opérateur, utilisant le système sans en comprendre le fonctionnement ? Cette

question devient d'autant plus aiguë lorsqu'on projette le scénario à 2050, avec des pilotes qui ne sont pas encore nés, et qui succéderont à des générations habituées à utiliser des systèmes complexes sans en maîtriser la connaissance de leur fonctionnement. S'agissant d'un système critique pour la sécurité des personnes, la réponse paraît évidente. Oui, le pilote devra pouvoir comprendre pourquoi et comment le système réagit. Pour naturelle qu'elle paraisse, cette réponse n'est pas suffisante. L'accidentologie montre qu'aujourd'hui les compétences des pilotes touchent parfois aux limites du système et que le comportement du système peut être mal compris par le pilote. Quand l'avion sera plus automatique, donc encore plus complexe, l'enjeu de la juste maîtrise de son fonctionnement par le pilote sera bien un autre défi majeur. La nature et la qualité de l'interfaçage, cockpit à bord ou au sol, devront être à la mesure de cet enjeu (voir livret 4).

Enfin, regardant non plus la formation initiale des pilotes mais leur formation continue, le maintien des compétences apparaît comme le dernier défi à relever. En effet, dans un contexte de transport de masse, les exigences fonctionnelles, notamment en termes de sécurité, amèneront à concevoir un système automatique extrêmement performant, dans la suite de l'amélioration continue des équipements embarqués que connait l'aviation depuis ses débuts. Dès lors, le pilote maintiendra aisément ses compétences pour les situations nominales et légèrement dégradées, mais qu'en sera-t-il pour l'aptitude à gérer les situations de crise et exceptionnelles ? La réussite d'un transport aérien plus automatique passera par la définition d'un nouveau concept de formation, où la formation continue aura plus d'importance que la formation initiale et occupera un volume conséquent dans le temps de travail du pilote.

Une perspective élargie

Pour une parfaite intégration de l'avion plus automatique dans le système de transport aérien, c'est l'ensemble de l'écosystème autour de lui et du pilote qui devra évoluer. De nouveaux métiers verront le jour, d'autres changeront de nature ou en compétences.

La fonction gestion du vol et gestion du trafic seront peut-être elles-mêmes revues totalement pour concourir à une gestion globale de mission. Ce nouveau paradigme créera une nouvelle donne dans l'organisation des services, des métiers et des compétences.

Autour du pilote et du contrôleur aérien (ou de celui qui aura la responsabilité de la gestion du trafic aérien), toutes les parties prenantes contribueront aux changements.

Ces changements accompagneront les tendances de fond sur les capacités technologiques :

- Une connectivité croissante entre les sous-systèmes et les systèmes, rendue possible par les performances toujours plus fortes des liaisons de télécommunications.

- Une intégration renforcée, entre les systèmes (notamment entre le sol et le bord), qui induit de nouveaux partages de responsabilités entre les acteurs.
- Une complexité accrue, conséquence inéluctable des progrès scientifiques et techniques. Il s'agira de garder au système un niveau minimal d'intelligibilité pour l'homme, en masquant habilement sa complexité qui dépasse déjà les capacités cognitives humaines à un instant donné.

L'avenir de la formation

Pour relever les défis identifiés plus haut, la formation devra continuer de décloisonner les spécialités. Alors que les systèmes seront toujours conçus et développés par des ingénieurs, ces systèmes seront de plus en plus exploités par des opérateurs munis de compétences hybrides.

Les programmes de formation devront s'enrichir de multidisciplinarité, d'exercices croisés (comme l'ENAC le fait déjà pour les élèves contrôleurs et les élèves pilotes de ligne), d'enseignements non techniques et innovants, amenant l'élève à mieux appréhender la globalité d'une situation, à savoir prendre des initiatives et faire tomber les murs pour créer la rupture quand c'est nécessaire.

A moyen terme, les organismes de formation comme l'ENAC axeront leur action sur les priorités suivantes :

- Continuer de veiller les évolutions nécessaires en matière de compétences professionnelles
- Lier davantage la théorie et la pratique dans les programmes de formation
- Améliorer la formation aux situations inhabituelles et d'urgence, à la maîtrise des situations inattendues voire imprévues
- Développer la culture croisée et la compréhension mutuelle entre les différents opérateurs

A plus long terme, pour accompagner la transition vers un avion plus automatique, il faudra certainement définir précisément une cible globale et cohérente. C'est aussi en définissant les futurs métiers précisément que le chemin de la transition gagnera en robustesse vers une nouvelle distribution des fonctions entre l'homme et la machine.

ASPECTS JURIDIQUES

Gérard ROZENKNOP (Membre de l'AAE)

D'après la présentation de Mme Sophie MOYSAN (Réunion Aérienne) au colloque AAE de juin 2016

A l'horizon 2050, se profilent :

- un transport aérien de passagers de plus en plus automatisé, effectué avec des aéronefs ultra connectés n'ayant plus qu'un seul « pilote » à bord chargé de superviser la machine et d'intervenir en cas de problème imprévu, doublé d'un « pilote » contrôleur au sol, basé dans un centre d'exploitation et relié à la machine et au pilote à bord par des liens de communication fiables et sécurisés, et
- un transport aérien de marchandises pouvant déjà être complètement automatique ou presque (drones télé-pilotés voire autonomes)

Il est d'ores et déjà anticipé que quelques décennies plus tard, le transport de passagers pourra à son tour être effectué par des aéronefs sans pilote à bord et même complètement autonomes.

Ce transport aérien du futur sera bien plus sûr encore, avec pour objectif d'ici 2050, un taux d'accident drastiquement réduit par rapport à aujourd'hui, ce dans le contexte pourtant d'un trafic aérien multiplié par 3 selon les prévisions actuelles.

L'automatisation croissante du transport aérien devrait en effet avoir pour effet de réduire significativement le taux d'accident (en réduction notable déjà, par rapport à la génération précédente d'aéronefs), sachant que le facteur humain est aujourd'hui la principale cause et de loin des accidents, à titre primaire ou contributif.

Pour autant, le risque zéro n'existant pas, des accidents d'aéronefs continueront à se produire faisant des victimes à bord et au sol. Qui en portera la responsabilité juridique dans ce contexte annoncé de responsabilités techniques multiples, de plus en complexes, interconnectées et partagées ?

Le cadre juridique régissant les responsabilités en matière de transport aérien devra-t-il être modifié du fait de ces évolutions technologiques ? Est-il adapté aux réalités qui se dessinent dès aujourd'hui ?

En raison de la nature éminemment internationale et transfrontière du transport aérien, le cadre juridique régissant les responsabilités en cas d'accidents se décline à 3 niveaux :

- au niveau international: « Système Varsovien»
- au niveau régional (UE)
- au niveau national.

Toute l'évolution de la réglementation depuis 1929, année d'adoption de la Convention de Varsovie a été dans le sens d'une responsabilité de plus en plus stricte du transporteur aérien et d'une indemnisation de plus en plus complète des dommages, particulièrement en cas de dommages corporels (y/c décès).

Bien que l'évolution juridique n'apparaisse pas avoir été directement induite par les changements technologiques majeurs intervenus au fil des décennies, elle n'aurait sans doute pas été possible sans l'amélioration très sensible de la sécurité des vols.

Cette évolution s'inscrit en effet dans une évolution plus globale du droit de la responsabilité au cours du siècle dernier, particulièrement dans les pays développés, tendant à une indemnisation de plus en

plus systématique et intégrale des victimes d'accidents de transport et d'accidents liés aux produits, l'opinion publique dans ces pays tolérant de moins en moins que les victimes de tels accidents ne soient dédommagées qu'en cas de faute commise par l'opérateur ou le fabricant ou qu'incomplètement du fait de plafonds d'indemnisation prévus par des textes destinés à protéger certains secteurs d'activité.

Typiquement, l'opinion publique dans les pays développés ne tolère plus que la victime d'un accident d'avion puisse ne pas être aussi bien indemnisée que la victime d'un accident de voiture alors même que l'avion est réputé être un moyen de transport beaucoup plus sûr que la route.

Bien entendu, la perception des choses est assez différente dans les pays en voie de développement où l'opinion publique n'a pas (encore) les mêmes exigences en matière d'indemnisation des accidents et où la priorité est d'assurer la viabilité des transporteurs nationaux ou locaux que de trop forts niveaux d'indemnisation et par voie de conséquence des coûts d'assurance aggravés pourraient mettre en péril.

Ces attentes divergentes des pays développés d'une part et des pays en voie de développement de l'autre expliquent pour une large part l'état du cadre juridique actuel de la responsabilité des transporteurs aériens, et les difficultés et la lenteur qu'il y a à le faire évoluer.

A titre d'exemple, près de 4 décennies ont été nécessaires à l'élaboration et à la signature en 1999, à l'issue d'intenses tractations diplomatiques, de la Convention de Montréal (Convention pour l'unification de certaines règles relatives au transport aérien international) destinée à moderniser et remplacer la Convention de Varsovie de 1929 ; 70 ans séparent la signature de ces 2 conventions.

Très sommairement le cadre juridique est actuellement le suivant : responsabilité de « 1ère ligne » du transporteur aérien n'excluant pas la responsabilité éventuelle d'autres parties prenantes en 1ère ou 2nde ligne.

Responsabilité du transporteur aérien

Comme précédemment indiqué, le cadre juridique applicable se décline à plusieurs niveaux (international, régional et national).

Ainsi, les transports aériens internes peuvent être soumis à des droits nationaux, variables d'un pays à l'autre, ne reprenant pas nécessairement les principes fixés dans les conventions internationales, lesquelles régissent uniquement des transports aériens internationaux.

Toutefois, d'une manière assez générale, les responsabilités pour dommages causés aux passagers ou aux tiers au sol par des accidents d'aéronefs sont focalisées sur le transporteur aérien dont la responsabilité est soit une responsabilité pour faute présumée, soit une responsabilité stricte (autrement dit objective ou de plein droit). Ainsi les victimes peuvent-elles obtenir une indemnisation sans avoir à rapporter la preuve d'une faute commise par le transporteur ou par un tiers (fabricant, autorité de contrôle aérien..), ce qui est heureux compte tenu de la grande complexité technique des causes, souvent multiples et combinées des accidents aériens ; causes qui de surcroît ne constituent bien souvent que des hypothèses probables (généralement suffisantes pour en tirer des enseignements en matière de sécurité aérienne) mais pas toujours démontrées (et dès lors insuffisantes au plan juridique).

Toutefois, cette responsabilité stricte ou présumée du transporteur aérien n'est pas exclusive. Le transporteur tout comme la victime d'ailleurs peut recourir contre les tiers responsables ou co-responsables de l'accident (cause contributive) : autorités de contrôle aérien, autorités de certification, avionneur, motoriste, équipementiers, sous-traitants, aéroport, prestataires aéroportuaires, ateliers de maintenance, etc.…

Responsabilité du transporteur aérien pour les dommages aux passagers :

Au niveau international, la responsabilité du transporteur pour les dommages aux passagers est régie par le « Système Varsovien » composé

- d'une part de la Convention de Montréal de 1999 (entrée en vigueur en 2003) et destinée à moderniser et remplacer la Convention de Varsovie
- d'autre part, de la Convention de Varsovie de 1929 (entrée en vigueur en 1933) complétée de ses protocoles modificatifs mais qui reste applicable aux transports réalisés entre Etats qui n'ont pas ratifié la Convention de Montréal ou entre un Etat ayant ratifié la convention de Montréal et un Etat ne l'ayant pas ratifiée.

Ces conventions régissent également les responsabilités pour dommages aux bagages et marchandises transportés.

La Convention de Varsovie instituait une responsabilité plafonnée pour faute présumée du transporteur dont ce dernier pouvait s'exonérer en rapportant la preuve que lui et ses préposés avaient pris toutes les mesures nécessaires pour éviter le dommage ou qu'il leur était impossible de les prendre ou encore en rapportant la preuve d'une faute de la victime. En contrepartie, dans un souci de protection de l'industrie naissante du transport aérien international, la responsabilité du transporteur était fortement plafonnée (125 000 Francs Or Poincaré soit approximativement 10 000 USD). Le Protocole de la Haye de 1955 est venu doubler la limite initialement fixée pour les passagers la portant à approximativement 20 000 USD. Face à la faiblesse de cette limite, le gouvernement américain a imposé en 1966 un plafond plus élevé (75 000 USD) pour tout transport international dont le point d'origine, de destination ou d'escale se situait aux USA.

Entre 1970 et le début des années 1990, plus aucune initiative n'est intervenue pour améliorer l'indemnisation des passagers internationaux. Les passagers internationaux victimes d'accidents aériens et leurs ayant droit ne pouvaient alors obtenir une indemnisation complète qu'en tentant de démontrer une faute inexcusable (« équivalente au dol ») du transporteur ou de ses préposés ou la responsabilité d'autres parties prenantes que le transporteur (avionneur, …)

Puis, dans les années 1990, diverses compagnies aériennes se sont contractuellement engagées à supprimer tout plafond de responsabilité pour les dommages corporels aux passagers. Des accords-cadres IATA s'en sont suivis, entrés en vigueur en 1997 instituant un système de réparation à 2 niveaux :

- responsabilité objective (de plein droit) du transporteur jusqu'à 100 000 DTS (approximativement 140 000 USD), sauf à prouver la faute de la victime,
- au-delà, responsabilité pour faute présumée avec possibilité pour le transporteur d'invoquer les moyens de défense de la Convention de Varsovie.

L'essentiel des aménagements prévus dans ces accords cadre IATA a été repris dans la Convention de Montréal dont le Préambule affirme : *« L'importance d'assurer la protection des consommateurs dans le transport aérien international et la nécessité d'une indemnisation équitable fondée sur le principe de réparation »*.

La Convention de Montréal retient donc le mécanisme d'une responsabilité à 2 niveaux :

- une responsabilité de plein droit du transporteur pour les dommages corporels aux passagers (y/c décès) jusqu'à 113 100 DTS (les limites ayant été réactualisées en 2009), soit approximativement 160 000USD, sauf preuve par le transporteur de la faute de la victime ;
- au-delà, une responsabilité pour faute présumée du transporteur, dont ce dernier ne peut s'exonérer qu'en prouvant l'absence de négligence de sa part, la faute de la victime, ou encore la négligence d'un tiers.

Au niveau de l'Union Européenne, la Convention de Montréal est d'application directe depuis 2004 même pour les transports internes. Son régime est complété par des règlements communautaires notamment :

- le Règlement 889/2002 exigeant du transporteur communautaire le paiement d'une avance dans les 15 jours suivant l'identification de la personne à indemniser pour faire face à ses besoins immédiats (ne pouvant être inférieure à 16 000 DTS en cas de décès, soit approximativement 20 000 Euros) ;
- le Règlement 785/2004 imposant aux transporteurs aériens « qui utilisent l'espace aérien à l'intérieur, à destination, en provenance ou au-dessus du territoire d'un Etat membre » de souscrire une couverture d'assurance minimale de 250 000 DTS (approximativement 310 000 Euros) par passager pour la responsabilité à l'égard des passagers. Ce règlement impose également des minima d'assurance pour les dommages aux bagages et au fret.

Responsabilité du transporteur aérien pour les dommages aux tiers au sol ou en cas de collision en vol

Après l'échec d'une première convention internationale (la Convention de Rome de 1933 jamais entrée en vigueur), la Convention de Rome de 1952 (complétée par le Protocole de Montréal de 1978) a été adoptée pour régir les responsabilités liées aux dommages causés à la surface par des aéronefs étrangers. Toutefois, bien que la Convention et le Protocole soient entrés en vigueur (respectivement en 1958 et 2002), peu d'Etats Membres de l'OACI les ont ratifiés de sorte que leur portée est assez limitée. En particulier, ne les ont pas ratifiés ou les ont dénoncés : les USA, le Canada, la Chine, l'Australie, le Japon et la plupart des Etats Membres de l'Union Européenne dont la France. Ces textes ne traitent pas des responsabilités en cas de collision en vol, sauf pour ce qui concerne les dommages en résultant au sol.

En substance, ces traités posent le principe d'une responsabilité stricte du transporteur aérien pour les dommages causés à la surface (le transporteur ne pouvant s'exonérer qu'en prouvant la faute de la victime) mais plafonnent en contrepartie cette responsabilité à des montants assez faibles variant en fonction de la masse maximale au décollage de l'aéronef.

Seule la preuve de la faute intentionnelle du transporteur aérien ou de ses préposés est de nature à permettre à la victime de faire sauter le plafond de responsabilité et d'obtenir pleine et entière compensation.

Nombre de pays n'ayant pas ratifié ces traités, les dommages causés à la surface relèvent dès lors essentiellement des droits nationaux lesquels sont très disparates, même au sein de l'Union Européenne (UE). Ainsi, certains Etats dont la France édictent une responsabilité stricte et illimitée du transporteur aérien, d'autres comme les Pays-Bas une responsabilité pour faute, le Royaume-Uni quant à lui retient une responsabilité illimitée pour faute en cas de collision en vol mais une responsabilité stricte et illimitée pour les dommages au sol.

Au sein de l'UE, le Règlement 785/2004 impose aux transporteurs aériens « qui utilisent l'espace aérien à l'intérieur, à destination, en provenance ou au-dessus du territoire d'un Etat membre de souscrire des couvertures d'assurance de responsabilité civile à l'égard des tiers d'un montant minimal par accident, pour chaque aéronef, déterminé en fonction de sa masse maximum au décollage (MMD), y compris pour les risques de guerre ou le terrorisme (le montant d'assurance pour ces derniers risques pouvant toutefois être limité par un agrégat annuel, lorsqu'un montant par accident et par aéronef n'est pas disponible sur le marché de l'assurance). Le maximum requis est de 700 Millions de DTS (approximativement 1 Milliard USD) pour une MMD supérieure ou égale à 500 000 kg.

Responsabilité éventuelle d'autres parties prenantes

Comme indiqué précédemment la responsabilité de plein droit ou pour faute présumée du transporteur aérien n'empêche nullement le transporteur ni les victimes de recourir contre les tiers responsables ou co-responsables de l'accident (cause contributive) : autorités de contrôle aérien, autorités de

certification, avionneur, motoriste, équipementiers, sous-traitants, aéroport, prestataires aéroportuaires, ateliers de maintenance, etc.….

Les régimes juridiques régissant les responsabilités de ces diverses autres parties prenantes sont innombrables, certains de ces responsables potentiels n'ayant que des obligations de moyen, d'autres des responsabilités objectives, strictes et de plein droit ; certaines de ces responsabilités étant de nature contractuelle, d'autres de nature délictuelle ; l'étendue de la responsabilité dépendant du droit applicable, …

Il est en tout cas fréquent en cas d'accident aérien que la responsabilité d'autres parties prenantes que le transporteur aérien soit recherchée et qu'une part de responsabilité soit effectivement mise à leur charge, plus rarement la totalité.

En résumé, le cadre juridique fixant les responsabilités du transporteur aérien en cas d'accident aérien est extrêmement complexe, largement tributaire de Conventions Internationales qu'il est extrêmement difficile de modifier, compte tenu des divergences d'intérêt entre Etats.

Des évolutions de ce cadre juridique sont-elles nécessaires du fait des changements majeurs de technologie attendus d'ici 2050 ? Pas nécessairement.

- En effet, les Conventions Internationales régissant les responsabilités du transporteur aérien ne définissent pas ce qu'est un aéronef ce qui peut permettre de considérer qu'elles ont vocation à s'appliquer aux transports internationaux qui seraient effectués par des aéronefs sans pilote à bord aussi bien qu'aux aéronefs classiques.
  L'article 8 de la convention de Chicago de 1944 sur l'Aviation Civile Internationale considère d'ailleurs clairement les aéronefs sans pilote à bord comme des aéronefs :

  "No pilotless aircraft capable of being flown without a pilot shall be flown without a pilot over the territory of a contracting State without special authorization by that State and in accordance with the terms of such authorization.

  Each contracting State undertakes to insure that the flight of such aircraft without a pilot in regions open to civil aircraft shall be so controlled as to obviate danger to civil aircraft".

  De même le Règlement européen N° 216/2008 instituant l'Agence Européenne de la Sécurité Aérienne (EASA) prévoit implicitement que les aéronefs sans pilote dont la masse en ordre d'exploitation dépasse 15 kg relèvent des compétences de l'EASA, hors certains usages spécifiques (dont ne font pas partie les activités de transport de passagers ou de fret). L'EASA a d'ailleurs délivré une opinion technique le 18 décembre 2015 mentionnant expressément le transport international de fret par des aéronefs sans pilote de grande dimension (« large unmaned aircraft ») ainsi que le transport de personnes comme relevant de la catégorie des drones à certifier et à traiter comme des aéronefs classiques.

  Tant l'OACI que JARUS travaillent d'ailleurs déjà à l'élaboration de normes internationales de standardisation pour les aéronefs sans pilote.

- A fortiori, la mise en service à l'horizon 2050 d'aéronefs de transport de passagers ou de fret avec un seul pilote à bord plus un pilote contrôleur au sol n'appelle aucune modification des conventions internationales actuelles régissant la responsabilité des transporteurs aériens. Bien au contraire, la focalisation des responsabilités sur le transporteur aérien, responsable de plein droit des dommages aux passagers (ou présumé responsable des dommages aux marchandises) sera d'autant plus nécessaire que les responsabilités techniques dans ce nouveau contexte seront plus difficiles encore à démêler (risque « cyber » accru notamment).

Les évolutions du cadre international des responsabilités du transporteur susceptibles de se concrétiser à l'horizon 2050 consistent en fait en deux projets de Conventions Internationales visant à moderniser et compléter la Convention de Rome sur les dommages aux tiers à la surface. Ces textes ont été négociés lors de la conférence de Droit Aérien de Montréal de 2009 et l'un d'entre eux a été adopté : la convention sur l'indemnisation des dommages aux tiers résultant d'interférences illégales (autrement dit essentiellement d'actes de terrorisme), convention qui prévoit la constitution d'un fond international pour l'indemnisation des victimes de tels actes à hauteur de 3 Milliards de DTS (approximativement 4,3 Milliards USD). L'élaboration de cette convention fait bien entendu suite aux attentats du 11 septembre 2001. Reste à voir combien d'années seront nécessaires à son entrée en vigueur et si elle entrera jamais en application…

Livret 8 : DOMAINES CLES d'ETUDES et de RECHERCHES

Jean BROQUET (Membre de l'AAE)

Introduction

L'évolution vers une « aviation plus automatique, interconnectée » vise à améliorer « la sécurité des vols » et « l'efficacité économique » du transport aérien. Cependant même si divers scénarios d'introduction de plus en plus poussée des automatismes tendant vers l'autonomie des vols peuvent être envisagés, il est généralement reconnu que l'intervention humaine ne pourra pas être supprimée à l'horizon 2050 et que l'optimum pour assurer le meilleur niveau de sécurité des vols réside dans la recherche des meilleures combinaisons et conjugaisons des capacités de l'Homme et de la Machine selon le principe général de laisser faire à l'humain et aux automatismes ce que chacun peut faire le mieux en référence à la sécurité et à l'efficience. Ces combinaisons pourront évoluer dans le temps grâce aux développements technologiques et à l'acquisition d'expérience.

Ainsi les efforts de recherches qui intéressent le *pilotage des avions de transport commerciaux*, ou qui lui sont dévolus, portent-ils à la fois sur l'Humain et sur la Machine, avec pour objectifs :

- La compréhension du comportement humain en particulier lors des différentes situations rencontrées dans le cockpit d'un avion (imprévu, fatigue, stress, ...)

- Le développement des performances potentielles des machines (raisonnement cognitif, planification, prise de décision, robustesse, résilience ...)

- Les améliorations des interfaces (visualisation, perception, langages de communication ...) et des modes d'interaction et de coopération Homme-Machine,

- Le partage des rôles et l'ingénierie des interactions Homme-Machine

- La conception et le développement de logiciels interactifs,

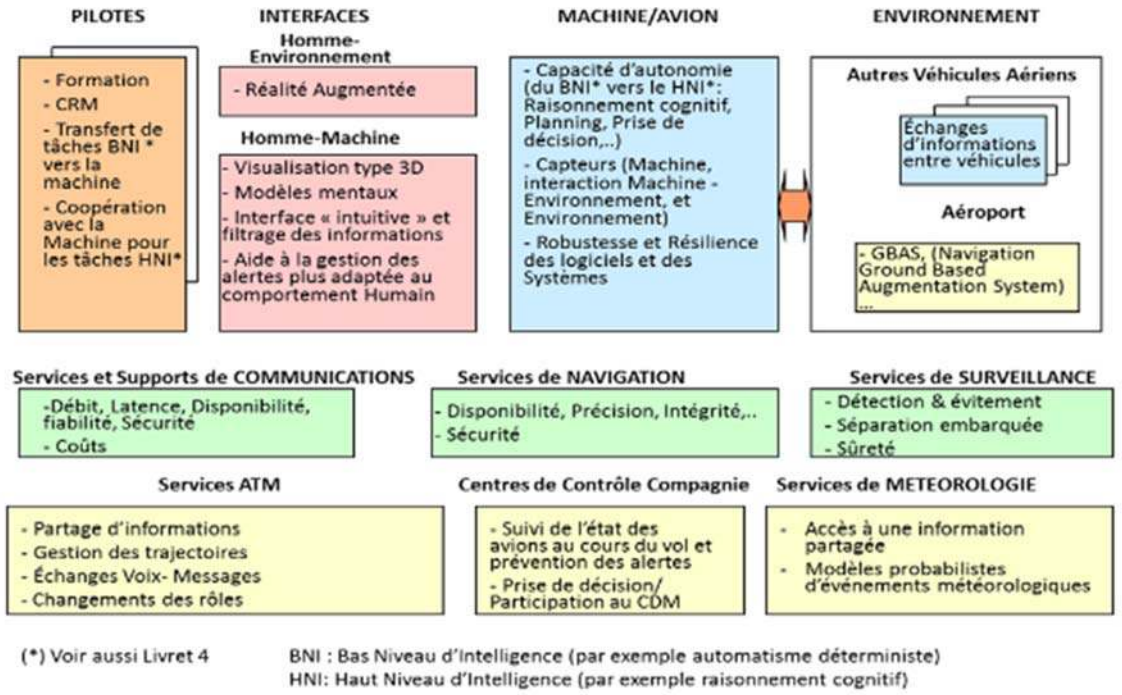
- L'ingénierie des systèmes hybrides (comprenant des hommes et des machines) de la conception, avec les outils nécessaires comme la simulation, à la certification.

Au niveau applicatif, le développement des moyens de télécommunications ouvre le champ des possibilités de réorganisation de l'ensemble des services impliqués dans le pilotage des avions de transport commerciaux. Des évolutions sont par ailleurs nécessaires pour faire face à l'augmentation et à la diversification du trafic. Les gains potentiels de performance passent le plus souvent par une complexité accrue du système de transport aérien. Outre la prise en compte des problèmes de sécurité et de disponibilité des liens de télécommunications et des contenus, l'étude de réorganisations potentielles doit donc inclure celle des règles et des méthodes de vérification et de certification des solutions envisagées.

L'ensemble des domaines de recherches et développement concernant l'amélioration de la sécurité des vols dans le cas du pilotage avec deux pilotes à bord est présenté sommairement sur la figure suivante.

L'évolution vers le pilotage avec un seul pilote à bord est considérée comme possible d'ici à 2050 si des réponses positives peuvent être apportées aux obstacles actuels et si des moyens de télécommunications additionnels peuvent mis en place avec le niveau de sûreté requis. Les recherches associées sont aussi adressées dans le Livret 5.

Figure. Ensemble des domaines de recherches et développement concernant l'amélioration de la sécurité des vols dans le cas du pilotage avec deux pilotes à bord



Note : La sûreté des télécommunications est un domaine critique qui, compte tenu des spécificités des techniques associées n'est pas directement abordée ici.

Ce Livret passe en revue :

- les domaines d'études et développements prioritaires en vue des améliorations du pilotage des avions de transport de passagers civils à l'horizon 2050, tels qu'identifiés par l'Académie de l'Air et de l'Espace,

- les domaines de recherches « amont » en cours et à poursuivre en support aux études et développements prioritaires. Plusieurs sujets de recherches majeures ont fait l'objet de présentations lors du colloque de l'AAE les 1 & 2 juin 2016 à Toulouse (Réf 2) « Le transport aérien sera-t-il tout automatique en 2050 ?».

Il présente enfin une courte synthèse et une mise en perspective des motivations actuelles et des orientations de la recherche pour améliorer la sécurité du pilotage.

1ère Partie : DOMAINES d'ETUDES et DEVELOPPEMENTS PRIORITAIRES

Les recherches en cours, dont celles exposées lors du Colloque « Le transport aérien sera t'il tout automatique en 2050 ? », montrent qu'il y a encore beaucoup de progrès possibles pour la sécurité des vols dans la configuration avec deux pilotes à bord en usage aujourd'hui.

Les interactions Homme-Machine pourront être rendues plus opérationnelles surtout en cas d'imprévu, en tirant le meilleur parti des capacités humaines, de mieux en mieux comprises, pour les tâches dites de « haut niveau d'intelligence » et de celles de la machine, en progrès constants, pour les tâches dites de bas niveau d'intelligence.

Les informations disponibles ou accessibles pour le pilotage s'enrichissent en diversité, pertinence, précision et fiabilité notamment pour la connaissance de l'état de l'avion, de son environnement immédiat et des risques météorologiques tout au long du vol selon les trajectoires choisies.

Beaucoup d'améliorations sont possibles à relativement court terme. Elles constituent donc des priorités pour les études et réalisations aujourd'hui en vue des évolutions du pilotage des avions de transport civil de passagers.

Les perspectives de mise en œuvre de nouvelles fonctions ou de nouvelles approches du pilotage, (y compris de nouvelles répartitions des fonctions bord et sol) à court ou moyen terme, sont présentées ci-après.

Automatisation du pilotage et maintien de l'attention des pilotes

Les deux aspects, l'un négatif, l'autre positif du comportement humain dans le pilotage aujourd'hui expliquent la difficulté d'améliorer rapidement la sécurité des vols en évoluant vers plus d'automatismes embarqués. Il est en effet reconnu par tous les acteurs que plus l'automatisation est poussée plus la tâche des pilotes est difficile lorsqu'ils doivent intervenir en cas d'inattendu et plus encore d'imprévu.

Une réflexion sur l'ensemble des automatismes actuels voire une réorganisation de ces automatismes semble nécessaire aujourd'hui en tirant le meilleur parti des leçons apprises lors des accidents impliquant des avions des dernières générations.

Automatisation

Les études en cours dans l'industrie sur les systèmes de pilotage par « trajectoire », (voir par exemple Réf 2.1 Bruno Nouzille, Thales : « Evolution des interactions Homme-machine et architecture avionique ») illustrent les démarches d'automatisation visant à donner aux pilotes un rôle essentiellement de gestionnaire et de décisionnaire. Ainsi, dans l'approche du pilotage de type « vol par trajectoire », le pilote gère la trajectoire courante et future jusqu'à destination.

L'interaction « Homme -machine » permettant aujourd'hui le management du vol « par fonction » va évoluer vers une organisation par « objets interactifs » permettant un management d'ensemble de fonctions. Ces objets interactifs seront définis dans le référentiel du pilote. Les organes de pilotage deviendront des désignateurs d'objectifs dont l'usage devra être ergonomique, instinctif, précis et robuste à l'environnement du cockpit (les claviers ne sont probablement pas éligibles à ce type de fonction)

Les évolutions dans le domaine de l'automatisation sont le plus souvent progressives ou additives. Ainsi, par exemple, Airbus (Réf 2.2 *Bernard Rontani,* Airbus*)* a introduit ces dernières années les fonctions innovantes liées à l'atterrissage : ROPS (Runway excursion prevention system) et BTV (Brake to vacate). L'étape suivante concernera l'ensemble des phases de vol (descente continue en phase d'approche, navigation 4D, réduction du bruit et de la consommation en phase d'approche, augmentation de la disponibilité et robustesse des automatismes). L'étape ultérieure, à plus long terme, visera une automatisation plus complète des opérations en vol et au sol.

Il est important, comme indiqué plus haut, de rompre parfois avec les évolutions additives pour refondre l'ensemble des automatismes avec une vision globale et une hiérarchisation des fonctions.

Au cours des efforts d'automatisation, Il convient de s'assurer que :

- les nouveaux automatismes ont bien le niveau d'efficacité et de sécurité requis pour décharger les pilotes d'un certain nombre des « interventions positives » d'aujourd'hui, et

- que les capacités d'interventions des pilotes, dans les autres cas, ne sont pas dégradées.

Il est donc nécessaire, comme indiqué dans plusieurs Livrets (Réf 1, Livrets 4 et 5), de caractériser au préalable, beaucoup plus précisément que cela n'est fait aujourd'hui, ces interventions (relevé des interventions en vol) en nature et en densité au long des vols.

Maintien de l'attention du pilote

Puisque l'automatisation entraine, pour les pilotes, un risque de perte de vigilance et de connaissance de l'état de l'avion et de son environnement à chaque instant, il est nécessaire de faciliter et renforcer les interactions et le dialogue Homme-machine. (Voir par exemple, Réf 2.3 Frédéric Falchetti, Dassault Aviation).

Des améliorations tirant parti des progrès technologiques y compris dans les interfaces « Homme-machine », pourront être apportées dans la présentation, à tout moment ou à la demande du pilote, des plans d'action de la machine. Cette présentation doit inclure des éléments de justification. Une demande de validation par le pilote (niveau à définir) pourrait être imposée pour toute action qui dépasse par exemple le simple niveau des asservissements ou qui entameraient de façon significative les marges de ressources de pilotage de l'avion. A cette fin, le rationnel des actions des systèmes automatiques embarqués doit être compris par le pilote ce qui impose que les systèmes embarqués fassent appel à des démarches qui peuvent être explicitées et rendus « lisibles » et « interprétables » en temps réel pour les opérateurs humains.

Note : Pour illustration, on notera que dans le domaine de l'intelligence artificielle, l'introduction de critères « d'interprétabilité » en temps réel par l'humain conduit à réouvrir le champ des recherches vers des techniques offrant des performances inférieures à l'état de l'art. Il est en général constaté que les techniques les plus performantes actuelles, telles que le « deep learning » pour la reconnaissance de forme sont aussi les moins « interprétables » en temps réel.

Le champ des recherches amont concernées inclut :

- *Compréhension et « modélisations » des limitations humaines opérationnelles*

- *Compréhension de la performance globale du système Homme-machine, y compris en cas de panne ou de situation imprévue*

- *Aides au pilote, Simplicité et efficacité des échanges Homme-machine ; Détection de perte de vigilance*

- *Ingénierie des interactions Homme-machine et méthodes d'évaluation du binôme « Humain-Automate »*

- *Sélection et formation des pilotes*

- *Répartition des rôles entre centres de contrôle et pilotes à bord ou au sol*

Transition entre pilote automatique et reprise en main manuelle en cas d'imprévu

Tous les acteurs concernés par le pilotage des avions soulignent l'une des faiblesses des systèmes actuels qui peuvent débrancher brutalement le pilotage automatique pour « rendre la main » au pilote dans certaines situations critiques imprévues, entrainant pour le pilote un « effet de falaise » décrit notamment dans les Livrets 2 et 4.

L'amélioration de cette situation est un objectif prioritaire. Les voies d'amélioration incluent :

- *En cas d'évolution d'une situation devenant progressivement critique,* dès l'apparition de tendances négatives ou des situations non nominales : l'émission d'alarmes progressives et l'ouverture d'un dialogue « humain-machine » assurant au pilote une meilleure connaissance et une meilleure perception de l'état de la machine et de son environnement,

- *En cas d'évolution brutale d'une situation* : l'aide à la compréhension de la situation avec notamment l'affichage de l'historique des données relatives aux premiers instants des événements non nominaux (apparition de pannes) qui conduisent à l'arrêt de fonctions automatiques

- *En cas de perte des capacités de pilotage automatique* : le maintien de « sous fonctions » de pilotage automatique (exemple : « contrôle de l'assiette ») pour permettre au pilote de concentrer son attention sur l'évaluation de la situation et le maintien de repères de position, ainsi que sur les actions à entreprendre.

- *En cas de perte d'intégrité de l'avion et de ses équipements* : l'apport d'une aide par la machine au pilote pour : (1) l'identification des ressources disponibles, (2) le repérage spatial, et (3) l'élaboration et l'évaluation de plans d'actions potentielles compte tenu des informations disponibles sur les ressources et l'environnement,

Le champ des recherches amont concernées inclut :

- *Compréhension des mécanismes du cerveau humain et des réactions du pilote face à l'imprévu*

- *Interfaces Homme-Machine : Langage, supports visuels, interactions pour les affichages*

- *Traitements massifs de données relevées à bord de l'avion pour identifier des évolutions potentiellement révélatrices de dégradation de l'intégrité ou des ressources*

- *Techniques de l'automatique appliquées à l'identification de paramètres de systèmes complexes*

- *Elaboration d'architecture de systèmes privilégiant la préservation de certaines fonctions de « secours » en cas de pannes et facilitant les approches globales de « détection, isolation et reconfiguration ».*

- *Approches systèmes de densification de capteurs (notamment avec des capteurs hétérogènes) pour améliorer la fiabilité des fonctions de détection ainsi que la connaissance de l'état de l'avion et de son environnement, en cas de situation critique, même imprévue.*

Utilisation de nouvelles techniques pour l'aide à l'interprétation des alarmes

La difficulté de rendre les alarmes « perceptibles et utilisables » par les pilotes lors des situations critiques est avérée comme le montrent encore divers accidents et tests récents. Des travaux de

recherches aident à rendre ces alarmes plus « efficaces » (voir par exemple Réf 2.4 *Stéphane Chatty*, ENAC).

Au-delà des améliorations possibles à court terme, certaines avancées dans le domaine de l'intelligence artificielle notamment, devraient pouvoir apporter aux pilotes, d'ici deux à trois décennies, des aides significatives à l'investigation et à l'analyse de situation et d'alerte dans les cas critiques.

Il est reconnu et admis que les techniques de l'intelligence artificielle pour la reconnaissance de forme, l'analyse de situation, la planification, et l'aide à la prise de décision sont encore aujourd'hui des sujets d'investigations, avec, pour les techniques les plus performantes, un niveau de fiabilité insuffisant pour une utilisation de façon autonome sur des systèmes critiques. Il est reconnu aussi que les techniques les plus performantes de l'intelligence artificielle se prêtent généralement mal à une compréhension par l'humain des raisonnements cognitifs de la machine et à une évaluation de la « robustesse » des résultats obtenus.

Néanmoins, pour aider les pilotes à prendre conscience de l'ensemble de la situation (état de l'avion, environnement) et pour explorer les actions potentielles dans les cas critiques, certaines techniques de l'intelligence artificielle pourraient être mises en œuvre prochainement, *en complément des systèmes actuels, à la condition que ces techniques n'interviennent en aucune façon dans des « actions » directes sur la machine.*

Protections enveloppes du vol et détection de comportements ou d'actions dangereuses du pilote

Le renforcement des protections enveloppes du vol devient possible, comme c'est le cas pour certains avions militaires (voir par exemple la présentation faite pendant le colloque de l'AAE par le *Colonel Damien Rouillé*, Armée de l'air française : «*Un exemple de réalisation d'automatisme avancé : Rafale »* Réf 2.5) , grâce à l'augmentation des capacités de calcul (développement des capacités de fusion de données, …) et de stockage de données à bord (données relatives au terrain, …) et grâce aussi à la densification des équipements embarqués.

Par exemple, l'utilisation conjointe des données des constructeurs sur les qualités de vol des appareils (au-delà des conditions limites des vols nominaux), et des données relatives au terrain permettrait à tout moment, à bord des avions de transport de passagers, de calculer les trajectoires de vol possibles et d'engager automatiquement les actions nécessaires pour tenter d'éviter la collision avec le sol.

Le niveau des protections enveloppe, sous forme de détection et alerte ou d'action automatique, au cours de certaines phases du vol ou de l'ensemble du vol en complément aux protections actuelles, doit être étudié à la lumière des accidents et incidents survenus sur les avions de dernière génération.

L'intérêt et les moyens de détecter des comportements ou des actions dangereuses des pilotes, comme par exemple des écarts significatifs par rapport à un plan de vol initial dus à l'action des pilotes, doivent également être analysés. L'utilisation d'alertes à la sécurité du pilotage pour déclencher une intervention depuis le sol dans les cas extrêmes est aussi à analyser dans le cadre de l'évolution des rôles bord et sol à moyen terme.

Le champ des recherches concernées inclut :

- *l'ingénierie des interactions Homme-machine*
- *les avancées dans le domaine de l'automatique*
- *l'analyse de données relevés lors de vols commerciaux sur les comportements et actions des pilotes*

Utilisation des probabilités associées aux événements météorologiques

Des études menées dans le programme Sesar ont permis de faire le point sur les prévisions météorologiques pour l'aviation (Voir Réf 1 Livret 7).

Elles ont montré en particulier que certains phénomènes météorologiques (convection, forte concentration de cristaux de glace, turbulence) restent peu prédictibles (Réf 2.7 *Jean-Louis Brenguier*, Météo-France).

A titre d'exemple, le développement explosif d'un cumulo-nimbus n'est pas prévisible, même à un horizon très court (jusqu'au ¼h) et la turbulence en ciel clair reste non détectable par télédétection.

Pour pallier le manque de prévisibilité des phénomènes de nature chaotique, les services météorologiques font des prévisions d'ensemble, jusqu'à environ 24h, en faisant varier les conditions initiales et les paramètres de la physique non résolue ou non modélisable. Ils peuvent ainsi définir une probabilité d'occurrence d'un risque météorologique à proximité d'une trajectoire de vol 4D.

Cependant, assez généralement, le pilote dispose aujourd'hui seulement de cartes 2D, à différentes échéances mais sans les niveaux d'incertitude.

Des systèmes sol auraient la possibilité d'identifier, plusieurs heures à l'avance, toutes les trajectoires susceptibles de croiser un risque météorologique, de transmettre une alerte (*warning)* au pilote, de proposer des trajectoires alternatives et de transmettre l'information nécessaire pour choisir la meilleure stratégie d'évitement.

Demain il sera donc possible :

- de faire une analyse automatique des champs 4D à haute résolution avec les informations d'incertitude de prévision météorologique,

- de déterminer la trajectoire optimale avant le dépôt du plan de vol, puis la trajectoire de référence après le décollage pour pallier les incertitudes de la prévision jusqu'à la décision tactique,

- de compléter l'alerte météorologique universelle par des alertes dédiés à chaque vol, lorsque nécessaire, pour permettre l'adoption d'une stratégie d'évitement optimale.

Un thème « Environnement et Météorologie » a été inclus dans le domaine « Exploratory Research » de Sesar 2020 avec notamment l'objectif de tirer parti d'activités de recherche menées dans d'autre domaines et de les appliquer à celui de l'environnement et de la météorologie dans le contexte de l'évolution future de l'ATM.

Parmi les études envisagées, on peut noter :

- l'analyse et la quantification de l'incertitude d'origine météorologique sur la gestion des trajectoires,

- le développement de méthodes de prévisions probabilistes à court terme des phénomènes hivernaux et la réduction de l'incertitude sur la partie sol des trajectoires 4D.

D'autres travaux de recherche sont déjà en cours ou vont être lancés prochainement, notamment pour couvrir des domaines non encore traités de façon satisfaisante :

- détection des cristaux de glace, à partir de l'imagerie radar ou satellite ou par exploitation accrue des sorties des modèles,

- génération automatique d'alertes neige, brouillard, … au niveau des aéroports,

- en ce qui concerne la convection : quantification de l'incertitude sur les prévisions probabilistes à l'horizon de 24-48h et sur la prévision déterministe à un horizon de 3h

Le sujet des prévisions météorologiques, en particulier des avancées récentes pour la météorologie aéronautique obtenues notamment dans le cadre des projets SESAR et NextGen, fait l'objet d'un chapitre dans le Livret 7.

Nouvelles répartitions des rôles bord et sol et maîtrise fonctionnelle de la complexité croissante du système de transport aérien

Le système de transport aérien de passagers commerciaux doit faire face à l'augmentation du trafic et à l'irruption des drones de façon accidentelle ou nominale dans son espace aérien. La séparation entre avions se réduit progressivement et les systèmes d'anti collisions avec les autres avions équipés de transpondeurs et d'anti abordage avec les drones doivent être automatisés et miniaturisés.

Nouvelles répartitions des rôles bord et sol

Les opportunités offertes par les moyens de télécommunications par satellites ou par d'autres relais sont loin d'être autant exploitées qu'elles pourraient l'être aujourd'hui (vraisemblablement pour des raisons de coûts), entre le bord et le sol. Avec l'augmentation de l'offre de moyens de télécommunication et la réduction des coûts, un renforcement de la sécurité des vols pourra être obtenu au moyen d'une nouvelle répartition des rôles bord et sol et d'un développement de capacité d'intervention depuis le sol. Les problèmes de cyber sécurité devront bien évidemment être pris en compte.

D'une façon générale une coordination plus étroite devra être établie entre tous les acteurs du transport aérien, vraisemblablement associée à une décentralisation plus grande de certaines décisions au niveau de chacun des avions. La répartition future des rôles entre le bord et le sol pour les prises de décisions est un sujet d'étude important.

Les recommandations faites dans le Livret 7 pour la « gestion de la circulation aérienne » portent notamment sur les points suivants :

- Étude de nouvelles répartitions des fonctions, des rôles et des décisions entre l'ATC au sol, le CCO (Centre des opérations de la Compagnie aérienne) au sol, les pilotes et les automatismes associés. Evaluation de la faisabilité et des performances.

- Analyse des conditions de mise en œuvre du service de contrôle par vol ou paquet de vols au lieu d'une mise en œuvre par secteur géographique ?

- Etude de l'insertion des drones dans des espaces non ségrégués et sur les aéroports avec le niveau sécurité acceptable ? Quel sera l'impact sur la capacité de l'espace aérien et des pistes ?

- Analyse des conditions qui permettraient d'automatiser les procédures ATC. (exemple : systématisation du « Point-merge », rôle des systèmes embarqués et au sol, performances des communications). Quels automatismes embarqués faciliteraient l'évolution de l'ATC ?

- Etude des conditions et approches pour assurer la cohabitation entre des avions dotés de capacités différentes dans un même espace ? (BCBS : Best Capable Best Served et conséquences/acceptabilité). Ce sujet déjà évoqué à l'OACI ou dans SESAR mérite encore un approfondissement.

Maîtrise fonctionnelle de la complexité croissante du système de transport aérien ; Allocation des fonctions

La multiplication des intervenants (pilotes, avions, contrôleurs, …) avec notamment l'augmentation du trafic aérien, conduit à une recherche d'autonomie des avions avec coordination inter agents, et prise en compte de l'environnement (trafic, météorologie, événements imprévus).

L'automatisation totale » ou « autonomie » dans le domaine aéronautique (vue comme une autogouvernance en face de l'incertitude) rencontre aujourd'hui des obstacles majeurs tels que des phénomènes et comportements mal compris ou mal connus (par exemple dans le domaine météorologique) ou des difficultés à spécifier les logiciels et à évaluer la performance d'un système complètement ou même largement automatique. L'humain doit garder un rôle majeur dans le système.

L'allocation des fonctions entre humains et machines s'appuie sur :

- l'automatisation des fonctions systèmes répondant à des règles transposables en des actions machine

- le développement des procédures pour les actions humaines prévisibles

- l'autonomie des intervenants (principalement humains) pour la résolution de problèmes, avec une coordination entre ces intervenants.

Le système dit « multi-agents » peut être modélisé comme un réseau de fonctions dont la complexité apparait aussi bien dans les liens que dans les fonctions elles-mêmes.

L'utilisation de modèles de simulation sur ordinateur permet de créer des systèmes virtuels sur la base desquels peuvent être analysés et évalués les futurs systèmes. C'est l'objet de recherches présentées brièvement au chapitre suivant.

Le champ des recherches amont concernées inclut :

- Ingénierie des interactions et de l'interface Homme-machine et plus généralement " Homme-systèmes »

- Maitrise de la complexité des systèmes et de leurs logiciels

- Maitrise de la résilience des systèmes

- la disponibilité et la sécurité des communications aéronautiques

- la répartition des rôles entre les centres de contrôle et avec les pilotes

- la validation des systèmes complexes et de leurs logiciels

Maîtrise des développements industriels de systèmes complexes

Avec le développement de l'interactivité, les systèmes globaux de transport aérien deviennent de plus en plus complexes. C'est aussi le cas en particulier pour les systèmes embarqués à bord des avions, avec l'introduction de nouvelles fonctions pour l'automatisation du pilotage et pour l'interconnexion ainsi que de nouveaux équipements de mesures.

Cette complexité fait apparaitre de nouveaux besoins de techniques, méthodes et outils, notamment pour :

- la conception et la mise au point de systèmes complexes incluant des agents humains et machines hautement interactifs. Ces systèmes doivent répondre à des exigences critiques de résistance aux agressions, de robustesse et de résilience au cours de la vie opérationnelle (voir Réf 2.6) en tenant compte des caractéristiques et limitations opérationnelles humaines.

- la conception de systèmes embarqués avec des exigences critiques de détection, isolation et reconfiguration en cas de pannes

- la spécification, le développement, la validation et les tests des logiciels (embarqués ou au sol) et la vérification, la validation et la certification du système global

- le suivi de l'intégrité tout au long de la vie opérationnelle, et la maintenance évolutive

Le champ des recherches amont concernées inclut :

- les architectures de systèmes et les technologies facilitant l'introduction de nouveaux équipements et de nouvelles fonctions, avec une approche structurée de Détection, Isolation et Reconfiguration en cas de panne,

- les bases théoriques et les méthodologies de modélisation et de simulation permettant le développement, la mise au point et l'évaluation de systèmes automatiques et d'interactions « Homme-machine » complexes, pour l'aéronautique,

- les méthodologies et outils logiciels pour l'ensemble de la chaîne depuis la capture des besoins jusqu'à la validation du logiciel, répondant à la complexité croissance des systèmes et aux exigences de réalisme industriel quant aux coûts et à la durée des développements,

- les méthodes et outils pour la vérification, la validation et la certification de systèmes automatiques et les contraintes à introduire dès les phases de conception de ces systèmes pour permettre leur utilisation,

- les méthodologies pour l'introduction de technologies non utilisées traditionnellement dans l'aéronautique (exemple : Logiciels « open source », équipements électroniques grand public).

Extension des nouvelles répartitions des rôles bord et sol : le cas du pilotage avec un seul pilote à bord

Le cas du pilotage avec un seul pilote à bord peut être analysé dans le cadre des évolutions des répartitions des rôles bord et sol en tenant compte du fait que la nature des tâches des pilotes va être modifiée et que la « constante de temps » d'intervention pourra, au moins pour certaines tâches, être allongée.

L'analyse des problèmes potentiels posés par une telle évolution est largement discutée dans les Livrets 4 et 5.

Les domaines d'investigation et d'études à mener couvrent notamment (voir Livret 5) :

- la caractérisation des défaillances physiologiques (voire aussi mentales) des pilotes et leur détection,

- l'analyse des modes d'intervention des pilotes au sol et interfaces avec le pilote à bord et l'avion,

- la disponibilité des moyens de télécommunications avec les niveaux de performance requis : ressources en fréquences, architecture en réseau et protocoles d'échanges pour assurer la sécurité, l'intégrité et la disponibilité (voir aussi Livret 7)

- l'organisation des centres d'opérations au sol,

- la standardisation des affichages au sol (relatifs aux éléments de cockpit) pour faciliter l'organisation des centres d'opérations,

- le vol en autonomie complète après défaillance du pilote à bord et avant la reprise en main par un pilote au sol, voire jusqu'à l'atterrissage en cas d'indisponibilité de liaison de télécommunication,

- le management du pilotage depuis le sol.

On notera par exemple qu'après la mise en œuvre du nEUROn, Dassault mène des investigations sur la problématique du nombre « n » de pilotes requis au sol pour le pilotage d'un ensemble de « m » drones, selon les tâches à accomplir par les drones (Réf 2.3 *Frédéric Falchetti,* Dassault Aviation).

- Autres (voir Livrets 4 et 5)

Pilotage de plus en plus autonome

L'automatisation du pilotage, dans un contexte donné et pour une tâche ou un ensemble de tâches donnés peut consister en :

- Une aide conçue pour fournir des informations permettant la prise de décision par un pilote ou un opérateur humain

- Une action indépendante du pilote ou de l'opérateur humain aussi longtemps que certaines conditions sont remplies, mais nécessitant une surveillance continue et une intervention humaine dans les cas où ces conditions ne sont plus remplies, et ce afin d'assurer le niveau de performance et de sécurité requis

- Une action indépendante de tout pilote ou opérateur humain, à un moment ou sur une période de temps donné, ne nécessitant pas de surveillance humaine continue. On peut parler alors de « système autonome » pendant les phases considérées.

L'étape ultime d'un « système complétement autonome » pour le transport aérien est donc comprise ici comme la mise en œuvre d'un système capable de prendre des décisions et d'agir, dans un contexte donné, sans assistance et sans supervision continue d'un humain.

Autonomie temporaire dans le cas du pilotage avec un seul pilote à bord

La capacité de pilotage par la machine en autonomie complète pendant une partie du vol (depuis une dizaine de minutes jusqu'à une grande partie du vol voire jusqu'à l'atterrissage selon les cas), deviendra une nécessité si le pilotage avec un seul pilote à bord est mis en œuvre. Le nombre de vols nécessitant temporairement un recours au pilotage autonome (cas de défaillance sévère ou totale du pilote à bord ou cas de contrainte envers le pilote avec atteinte à la sécurité du vol) serait limité à quelques dizaines par an au niveau mondial (Voir Livret 5).

Le niveau démontré de sécurité du pilotage autonome aura un impact direct notamment sur la densité de la surveillance de l'état physiologique et mental du pilote à bord depuis le sol et sur les exigences de disponibilité des liens de communications.

Les capacités technologiques nécessaires pour atteindre un haut niveau de sécurité des vols pendant la phase de pilotage autonome, en espace aérien non ségrégué (même si une alerte peut être donnée à un certain nombre d'avions à proximité) incluent notamment :

- la séparation et l'espacement derrière un autre avion coopératif

- la détection et l'évitement entièrement autonome d'un autre avion ou d'un obstacle au moyen de détecteurs embarqués (transpondeurs, caméras haute résolution pour les avions légers), fusion de données et interprétation, prévision des risques de collision et génération des manœuvres d'évitement

- La détection et l'évitement de risques météorologiques

- La minimisation de dommages au sol en cas de perte sévère de ressources de l'avion en relation directe avec la défaillance ou la neutralisation du pilote.

- la prise de décision automatique d'engager un mode de pilotage autonome à partir de l'analyse de la situation dans le cockpit

- l'exécution du vol entièrement autonome jusqu'à la reprise en main depuis le sol, voire dans certains cas jusqu'à l'atterrissage.

Vers un pilotage de plus en plus autonome

On s'intéresse précisément ici aux problèmes rencontrés lors d'une évolution orientée vers une très large autonomie vis-à-vis des pilotes humains pour l'ensemble des vols et aux domaines d'études et développements correspondants tels qu'identifiés dans les deux rapports cités à titre d'exemples (US NRC Réf 3 et AIAA Réf 4).

Le projet nEUROn *On pourra se reporter, pour illustration, au cas du projet nEUROn (démonstrateur technologique couvrant divers aspects notamment dans les domaines de : furtivité, pilotage à distance, autonomie et sécurité associée) Voir Livret 6 (Réf 1.6 Alain Joselzon). L'interface Homme machine permet des interventions du pilote au sol à haut niveau (de type oui/non) ou à bas niveau selon les phases de vol. Le temps de latence des communications peut atteindre 1s. Le système contient plusieurs scénarios préprogrammés de missions sélectionnables en cas de besoin par le pilote sol. Le niveau de disponibilité de la liaison de communication est spécifié à 99%. La perte d'une liaison ne doit pas être critique pour l'avion qui effectue un retour automatique à la base en cas de perte totale (mode de contingence). Les logiciels du nEUROn sont tous de nature déterministe.*

L'autonomie « système » (sans intervention humaine) exige des capacités « machine » de connaissance et d'appréhension de la situation et de l'environnement, d'adaptabilité et de raisonnement cognitif bien au-delà de ce qui est mis en œuvre actuellement dans l'aéronautique. *Les thèmes de recherches correspondants incluent :*

- la capacité à maitriser des situations rares et non modélisées

- l'adaptation dynamique des systèmes aux évolutions (environnement, missions, plateformes, ...)

- la fusion de données multi-capteurs et la transformation en connaissances utilisables pour la prise de décision

- les modèles de représentation de la connaissance et les modèles mentaux d'échanges avec les humains lors des interactions « Homme-machine »

D'autres recherches doivent être menées dans les domaines de l'ingénierie, et de la vérification, validation et démonstration de sécurité et sûreté des systèmes adaptatifs, notamment sur *les thèmes suivants* :

- architectures de systèmes et technologies facilitant d'une part l'introduction du pilotage autonome sur de longues périodes avec supervision intermittente par un pilote/opérateur (y compris pour la vérification de l'intégrité du système), et facilitant d'autre part la vérification et la validation (y compris de la robustesse) au cours du développement et l'adaptation aux évolutions au cours de la durée de vie.

- méthodologies pour caractériser le comportement des systèmes « adaptatifs/non déterministes » et pour déterminer le niveau de sécurité et de confiance sur l'ensemble de leur cycle de vie.

- standards et procédures pour la vérification, la validation et la certification des systèmes autonomes

- méthodologies de reprise en main simple et rapide quand elle est nécessaire, à bord ou depuis le sol

Des recherches complémentaires doivent être menées pour la mise en œuvre de systèmes très autonomes dans les domaines suivants :

- disponibilité des communications et acquisition de données et Cyber sécurité

- coopération multi-véhicules ayant des capacités hétérogènes

- organisation des systèmes sol pour la prise en charge des avions autonomes (surtout à l'atterrissage).

Enfin les aspects légaux (voir Réf 2.8) et sociétaux doivent aussi être abordés.

2ème Partie : DOMAINES de RECHERCHES en SUPPORT aux ETUDES et DEVELOPPEMENTS PRIORITAIRES

Les principaux domaines de recherches (recueil et analyse de données en vue d'une amélioration et d'une conceptualisation de la connaissance) en support aux études et développements appliquées spécifiquement au pilotage des avions de transport civil (présentées en 1ére Partie de ce Livret) font ici l'objet de descriptions succinctes. Ces descriptions tirent largement profit des présentations faites par les chercheurs de différents horizons au cours du colloque de l'AAE « Le transport aérien sera t'il tout automatique en 2050 ». Les priorités des recherches peuvent être vues au travers des priorités d'études et développements présentées ci-avant.

Les efforts dans les domaines de l'élaboration de méthodologies et d'outils pour la spécification, le développement, la validation et la vérification des systèmes et de leurs logiciels critiques doivent aussi être mutualisés entre différents domaines d'applications.

La levée des obstacles pour la mise en œuvre de systèmes automatiques capables de faire face à l'inattendu et à l'imprévu, avec une efficacité égale ou supérieure à celle des pilotes, demandera beaucoup de temps y compris pour les aspects « légaux et « sociétaux » qu'il est donc important d'aborder aussi dès maintenant en parallèle des recherches et développements technologiques.

Le cas de l'intelligence artificielle : A long terme, les promesses de l'Intelligence artificielle, notamment, pour aller vers plus d'autonomie des systèmes, avec un objectif de sécurité encore accrue et une plus grande efficacité économique, sont reconnues par la plupart des experts du monde

aéronautique. Mais les recherches sur les diverses composantes et approches de l'Intelligence artificielle, dont la reconnaissance de forme et le raisonnement cognitif artificiel, demandent encore beaucoup d'efforts avant une mise en œuvre pour des « fonctions critiques » dans le pilotage des avions. Ces efforts peuvent être avantageusement mutualisés entre différents domaines d'applications potentielles tels que l'automobile, le spatial, le nucléaire, le transport ferroviaire et le transport maritime. L'aéronautique doit se rapprocher de ces autres domaines pour reconnaitre ses propres spécificités et s'assurer qu'elles sont bien prises en compte dans les recherches en cours.

L'intelligence artificielle n'est donc pas adressée comme un domaine de recherche *spécifique* à l'aéronautique dans ce chapitre.

Compréhension des comportements humains et conséquences sur la place des pilotes à bord

La compréhension du comportement humain lors des différentes situations rencontrées dans le cockpit d'un avion (imprévu, fatigue, stress, ...) est essentielle pour répartir au mieux les rôles entre le pilote et la machine. De nombreuses analyses ont déjà été effectuées pour tenter de comprendre les raisons des défaillances humaines, lorsque celles-ci sont responsables ou impliquées dans des accidents d'avions.

Certaines constantes peuvent être mises en évidence, par exemple dans les mécanismes neuropsychologiques de la mémoire court terme en situation opérationnelle à évolution rapide. C'est ce qu'a montré notamment *Jean Pinet*, AAE dans une thèse en psychologie et ergonomie présentée en juin 2011 à l'Université Toulouse II-Le Mirail : « Traitement de situations inattendues d'extrême urgence en vol ; Test d'un modèle cognitif auprès de pilotes experts ».

Dans le Livret 4 « Faut-il des pilotes à bord ?», *Jean Pinet* s'appuie sur les principaux résultats de sa thèse pour répondre à la question : Combien de pilote à bord ?

Deux points importants sont mis en lumière :

- les limitations humaines opérationnelles, désormais connues, doivent être prises en compte dans tout projet mixte humain-machine,

- les interventions humaines positives en correction de situations banales mais potentiellement dangereuses (d'occurrence plusieurs millions de fois plus élevée que celles négatives ayant entrainé un accident) doivent être quantifiées objectivement avant de réduire la présence humaine dans le cockpit.

Lors du colloque de l'Académie, *Frédéric Dehais*, ISAE (Réf 2.15) souligne aussi combien le comportement humain est impacté par les situations difficiles, avec tendance à ignorer les informations critiques et à focaliser indûment l'attention. La compréhension de ce phénomène pourrait être résolue par le rapprochement de la psychologie cognitive, l'ingénierie des systèmes et les neurosciences, en particulier la neuro-ergonomie. Les recherches actuelles semblent montrer la possibilité, à long terme, d'interfaçage cerveau-ordinateur.

Les analyses de comportement des pilotes en situation réelle relatés par *Robert Sumwalt, NTSB* (Réf 2.16) lors du colloque de l'Académie montrent précisément que :

- l'Homme n'est pas très performant lorsqu'il doit surveiller des systèmes très fiables, hautement automatisés sur de longues durées,

- si l'automatisation est importante mais non parfaitement fiable lors des prises de décision, alors l'opérateur peut ne pas détecter les cas de défaillance,

- les opérateurs peuvent faire trop confiance à la machine surtout s'ils ont par ailleurs des tâches manuelles à accomplir,

- l'Homme est étonnement peu capable de détecter des changements importants dans son champ visuel si ces changements ne sont l'objet de son attention,

- les obstacles à la surveillance effective sont divers : excès de confiance, ennui, fatigue, pression opérationnelle, inattention, …

Les recherches sur le comportement humain dans le cadre des études d'amélioration de la sécurité du pilotage doivent aborder les différents aspects suivants :

- *Observation et recueil de données* relatives aux taux d'interventions positives des équipages dans l'évolution des situations ; ainsi que : *Observation et recueil de données* sur les comportements entre pilotes au sein des équipages, en particulier en évitement d'erreurs ou en cas de comportement dangereux,

- *Etude neuropsychologique* des accidents et incidents aériens au même titre que des pathologies ; Rapprochement des comportements opérationnels vus de la psychologie et vus de la neurologie et application aux perceptions, aux choix et aux décisions en situation opérationnelle à évolution rapide ; Etude neuropsychologique de la mémoire à court terme en situation opérationnelle à évolution rapide ; Etude neuropsychologique du phénomène d'effet tunnel en situation opérationnelle à évolution rapide

- *Mise au point de moyens de mesure*, non invasifs et d'utilisation aisée et pratique, des comportements opérationnels ; Détection sûre des insuffisances psychologiques chez les pilotes ; Sélection et éducation des pilotes vis-à-vis de la maîtrise de soi, de l'estimation des risques, du stress, ...

Approche générale du partage des rôles entre l'Homme et la Machine

Optimiser la performance globale

Comme rappelé dans l'introduction, le partage des rôles entre l'Homme et la machine doit répondre au principe général de laisser faire à l'humain et aux automatismes ce que chacun peut faire le mieux en référence à la sécurité et à l'efficience.

Les performances requises pour le pilotage peuvent être classées en cinq catégories :

- Habileté pour le pilotage court terme

- Connaissances et respect des règles

- Compréhension d'ensemble des comportements possibles de l'avion dans son environnement et capacité de réaction face à l'inattendu

- Capacité de jugement dans un contexte incertain

- Maitrise d'ensemble du pilotage à un niveau « Expert », Capacité de réagir rapidement face à l'imprévu

Les limitations théoriques de la machine aujourd'hui se situent vers le troisième niveau de performance, là où commencent le besoin qualifié de « haut niveau d'intelligence ».

La compréhension du comportement humain est un élément essentiel pour définir le partage des rôles entre l'Homme et la machine, au même titre que la connaissance des capacités de la machine. Mais la capacité de dialogue ou plus généralement d'échanges entre l'Homme et la machine est aussi un élément essentiel à prendre en compte.

La mise en œuvre de systèmes complexes peut se heurter aux difficultés de rendre intelligible pour l'humain les éléments de choix ou de décision ou plus généralement les actions de la machine. On peut

donc être amené à préférer l'utilisation de techniques moins performantes mais offrant de meilleures possibilités de dialogue avec l'humain. C'est une réflexion actuelle dans le domaine de l'intelligence artificielle. On peut aussi être amené, pour les mêmes raisons, à limiter le niveau de délégation de tâches à la machine

Dans le domaine du pilotage, des enquêtes en cours sur la réponse des pilotes de la 4ème génération d'avions aux situations imprévues (voir *Arjan Lemmers*, NLR Réf 2.13) permettent d'alimenter la recherche avec des données relevées en situations réelles.

Définir clairement la question de l'autorité

Un autre aspect majeur du partage des rôles entre l'Homme et la machine est relatif à la question de l'autorité.

Le Livret 3 (Réf 1.3 *Jean-Claude Ripoll*, AAE) « La transition cybernétique du transport aérien de passagers, une approche théorique élémentaire et philosophique », aborde précisément une réflexion sur la structuration des automatismes et sur la place de l'humain dans l'ensemble du système de pilotage.

Au-delà du principe général qui, hors situation particulière, place l'autorité de l'Homme au sommet de la chaine décisionnaire, il est nécessaire de doter la machine de certaines capacités autonomes telles que la mise en œuvre d'actions de protection non décidées et non autorisées en temps réel par le pilote (par exemple : protection enveloppe du vol, ou protection contre des actions du pilote non cohérentes avec les plans de vol prévus précédemment).

Il y a donc, de fait, une double surveillance : celle de la machine par l'Homme et celle de l'Homme par la machine.

Ce partage de l'autorité entre le pilote et la machine doit être clairement défini : *Qui a le contrôle et qui décide pour quelles fonctions et avec quels moyens et quelles données* ?

A partir de recherches réalisées dans le cadre de la CERNA (Commission de réflexion sur l'éthique de la recherche en sciences et technologies du numérique d'Allistene – Alliance des sciences et technologies du numérique) *Catherine Tessier, ONERA* (Réf 2.14) identifie à titre d'exemple quelques sujets à traiter par les chercheurs pour chaque grande classe d'application :

- quelles reprises en main par l'opérateur/pilote au détriment du robot/machine, et quelles reprises en main par le robot/machine au détriment de l'opérateur/pilote, sont autorisées et quelles circonstances les permettent ou les rendent obligatoires

- comment s'assurer que les décisions du robot/machine ne soient pas prises à l'insu de l'opérateur/pilote ?

- jusqu'à quel point les logiciels d'interprétation du robot/machine caractérisent-ils correctement une situation et permettent-ils de discriminer entre plusieurs situations qui semblent proches ?

Les travaux de recherche doivent permettre de donner des réponses générales pour différents niveaux d'automatisation du pilotage des avions.

Les questions d'acceptabilité et d'éthique doivent également être abordées au cours de ces recherches.

Interface Homme-machine

Comme indiqué plus haut, la « qualité des moyens d'échanges » entre l'Homme et la machine est un élément essentiel de la performance de l'ensemble « Homme-machine ». La « qualité des moyens d'échanges » ou « qualité des outils d'interaction » est définie ici du point de vue du pilote en termes de facilité et « fiabilité » d'obtention ou de capture des différents types d'information en situation nominale comme en situation critique de l'avion. Les informations peuvent être délivrées par la machine de façon

continue ou en réponse à une demande active du pilote. Elles peuvent aussi être délivrées automatiquement en fonction des circonstances par la machine (alarme en situation de détresse par exemple). La performance obtenue sur le niveau d'attention du pilote est un des éléments de la « fiabilité » des échanges.

Les outils d'interaction font appels à des ressources et des compétences de types :

- technologiques : techniques et outils liés aux nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC)

- méthodologiques : génie logiciel, ingénierie système, logiciels interactifs

- facteurs humains dans l'ingénierie de l'interaction Homme-machine : ergonomie, psychologie cognitive, psychologie expérimentale, dans le but d'être capable de produire des logiciels ergonomiques et d'un haut niveau d'utilisabilité.

La plupart des éléments contributifs à ces moyens sont des sujets de recherches qui bénéficient de nombreuses synergies avec d'autres domaines d'applications. Une attention particulière est toujours portée dans le cadre des applications aéronautiques aux risques d'altération de la vigilance ou de focalisation de l'attention du pilote et aux autres effets contribuant à une dégradation de sa performance.

Des recherches visent à apporter encore des améliorations sur la visibilité des informations et alarmes au moyen de nouvelles approches d'ingénierie des systèmes (voir Réf 2.4 *Stéphane Chatty*, ENAC).

La machine peut apporter une « assistance active » au pilote en observant ses réactions et en modifiant les affichages ou le contenu d'informations (alarmes, …) pour déclencher en cas de nécessité, un retour d'attention. La détection de perte de vigilance est un domaine actif de recherche actuellement, notamment pour assurer un bon niveau d'efficacité opérationnelle.

Ingénierie des interactions « Hommes-machines »

L'automatisation (actions effectuées avec peu ou aucune action de l'opérateur humain) peut contribuer à de nombreuses améliorations de la sécurité du transport aérien. Cependant, en résolvant certains problèmes, elle introduit de nouveaux défis. Par exemple : l'automatisation augmente la performance Homme-machine dans le cas de charge moyenne des pilotes, mais diminue la performance (physique et mentale) dans le cas de charge faible ou forte.

Il est nécessaire d'améliorer les processus de conception et d'évaluation pour les binômes « humain-automate » et de développer des modèles d'ingénierie des systèmes prenant en compte l'hétérogénéité des comportements humains et des systèmes physiques.

Nécessité d'améliorer les processus de conception et d'évaluation pour le binôme humain-automate

L'analyse d'incidents et d'accidents récents (voir par exemple Réf 2.9 *Michael Feary* NASA Ames) confirme la nécessité de garder longtemps encore l'humain comme une composante importante des systèmes de transport aérien ; mais les rôles de l'humain vont évoluer.

La complexité des systèmes croit énormément avec l'augmentation du nombre de fonctionnalités à bord des avions et avec le niveau d'intégration des diverses composantes. On peut constater actuellement un accroissement du taux d'accidents dus à un défaut de maîtrise des interactions et couplages forts dans les systèmes dynamiques, plutôt qu'à des défaillances de composants. (Il est à noter que l'atteinte des limitations mentales humaines peut être considérée à la fois comme un défaut de couplage et comme une défaillance d'un agent du système).

Il est nécessaire d'améliorer les processus d'évaluation des binômes « humain-automate » et de

développer des modèles d'ingénierie prenant en compte l'hétérogénéité des comportements humains et des systèmes physiques

Sur quels modèles peut-on baser l'ingénierie des systèmes « Hommes-machines » ?

La problématique de l'ingénieur en charge de la conception des systèmes humains-machines est toujours complexe. Les Hommes sont-ils nécessaires et, si oui : pour quelles tâches et avec quelles exigences ? La capture de ces exigences, au cours des phases d'ingénierie, est particulièrement difficile car beaucoup d'entre elles sont « cachées », non « conscientes » et n'apparaissent que tardivement au cours du développement ou des tests, voire de la mise en service opérationnelle des systèmes.

L'ingénierie des systèmes humains-machines fait généralement appel à des modèles empiriques faute de pouvoir décrire de façon homogène les comportements humains et les systèmes physiques. Pour les artefacts on dispose de modèles physiques, de la théorie du contrôle, de modèles logiciels, de descriptions de système, ... Pour modéliser le comportement de l'homme on a des modèles de tâches, la théorie des processus cognitifs, et des modèles venant des neurosciences (Voir aussi Réf 1.4 *Jean Pinet* Livret 4). Mais on ne peut pas interfacer simplement ces deux types de modèles.

Les recherches portent sur 4 domaines :

- L'identification des exigences générales associées à de nouveaux moyens d'interaction

- L'identification des exigences spécifiques d'un projet donné, en l'absence de modèle, par une approche empirique basée sur des boucles rapides de maquettage et d'expérimentation avec les utilisateurs

- La conception de logiciels et d'architecture système supportant l'évolution des exigences ou du contexte opérationnel

- Le développement de modèles du comportement humain ; lorsque certains modèles ont été développés par les spécialistes des facteurs humains basé sur les neurosciences, ils sont à compléter par des modèles utilisables en liaison avec les modèles physiques et logiciels du système.

L'ENAC (Réf 2.4 *Stéphane Chatty*) explore pour l'ingénierie une voie basée sur un mélange des modèles cybernétiques et des modèles physiques ou informatiques, et s'appuyant, non pas sur des objets, mais sur les « relations de cause à effet ». Cette approche permet d'analyser les affectations de tâches entre l'humain et la machine. Elle sert de support pour les développements logiciels relatifs à ces systèmes hybrides « humains- machines ».

Pour les aspects « logiciels », le domaine de recherches inclut : la modélisation des logiciels interactifs, le développement de langages et architectures logicielles adaptées, la certification de composants interactifs, …

Ingénierie d'ensemble des systèmes de transport aérien

Approche générale

Le contexte actuel de la multiplication des agents (pilotes, avions, contrôleurs, …) avec notamment l'augmentation du trafic aérien, conduit à une allocation des fonctions entre humains et machines qui s'appuie sur :

- l'automatisation des fonctions systèmes répondant à des règles transposables en des actions machine

- le développement des procédures pour les actions humaines prévisibles

- l'autonomie des agents (principalement humains) pour la résolution de problèmes, avec une coordination entre ces agents.

Le système multi-agents peut être modélisé comme un réseau de fonctions dont la complexité apparait aussi bien dans les liens que dans les fonctions elles-mêmes. L'analyse des systèmes tire profit de la séparabilité en sous-systèmes.

L'utilisation de modèles de simulation sur ordinateur permet de créer des systèmes virtuels sur la base desquels peuvent être analysés et évalués les futurs systèmes. Ces approches avec modèles virtuels ont des faiblesses potentielles qui conduisent à introduire des critères (avec métriques) dits de « tangibilité » traduisant la possible réalité, la pertinence physique et la crédibilité opérationnelle des systèmes étudiés (Réf 2.10 *Guy Boy,* FIT, AAE).

La conception centrée sur l'humain s'appuie sur la connaissance et la compréhension des 3 composantes : Les personnes, les organisations et les technologies.

Un sujet de recherche type *:* Nouvelle répartition des rôles entre Contrôle de la circulation aérienne, Centre de contrôle des opérations et pilote pour le *Management des arrivées et le Séquencement en zone terminale.* (Réf 2.11 *Eric Hoffman*, Air Traffic Services R&D, ATM Directorate)

Plus l'environnement est complexe, plus le pilote attend des instructions simples. Le séquencement en zone terminale est un processus complexe dans un environnement hautement dynamique. La piste est une ressource rare qui, pour une utilisation maximale impose aux avions des temps d'attentes moyens non nuls.

Le séquencement s'effectue en 3 étapes itératives : (1) planification, (2) création (mise en ordre et espacement), (3) maintien.

Des outils sont disponibles pour aider à la planification et au maintien mais pas pour la création du séquencement et ce surtout à cause du manque de prédictibilité de « l'espace d'état » et de la nécessité de prévoir des marges de manœuvres et la mise en œuvre de procédures en cas de situations imprévues et/ou détresse dans le trafic.

L'une des voies de recherche est la réduction de l'espace de solutions possibles, en limitant par exemple les actions possibles (changements de vitesse seulement, …).

Ce type de recherche ouvre la voie à des échanges entre les contrôleurs aériens, les Centres d'Opérations des Compagnies aériennes (qui pourraient définir des priorités entre les avions), et les pilotes (qui pourraient assurer le contrôle de l'espacement entre avions). La tendance serait de standardiser et de systématiser les procédures plutôt que d'automatiser.

Maitrise du développement des systèmes embarqués et Résilience des systèmes

La complexité croissante des systèmes embarqués et de leurs logiciels fait apparaitre de nombreux sujets de recherche parmi lesquels :

- l'ingénierie des systèmes
- la spécification, construction et vérification formelle des logiciels algorithmiques
- la sûreté de fonctionnement et sa pérennité (résilience) tout au long du cycle de vie du système
- les approches de la Vérification, Validation et Certification des systèmes

Ces recherches peuvent être avantageusement mutualisés entre différents domaines d'applications potentielles tels que l'automobile, le spatial, le nucléaire, …

Spécification, construction et vérification formelle des logiciels algorithmiques critiques

L'utilisation de méthodes formelles pour le développement et la validation des logiciels algorithmiques critiques fait l'objet de recherches actives non ciblées par domaine d'application. Dans les faits, la propagation d'une méthode depuis un domaine d'application vers un autre est très largement freinée par les besoins de formation et d'entrainement des équipes logicielles et par le caractère non exhaustif des preuves et validations apportées par les méthodes et les outils logiciels dès que l'on replace le logiciel au sein d'un système réel.

Ainsi, par exemple, pour des raisons historiques la méthode « B » (à base de notations formelles) utilisée par des équipes de développement de métros automatiques (RATP) n'est pas utilisée dans les milieux aéronautiques et spatiaux.

L'extension de la méthode « B » (« Event-B ») consistant en une description de l'ensemble du système avec la même formalisation que les modules logiciels, et permettant ainsi de faire des « preuves formelles » au niveau système n'est encore utilisée que dans les milieux Universitaires. La prise en compte de systèmes hybrides (contrôle par logiciel de systèmes à évolution continue régis par des équations différentielles non résolubles analytiquement) est encore un sujet de recherche.

L'intérêt de telles recherches doit être souligné. L'évaluation des méthodes déjà utilisées avec succès dans le cadre d'autres applications critiques doit être encouragée activement dans le milieu industriel aéronautique.

Recherches dans le domaine de la résilience des systèmes

La résilience est définie ici comme la garantie que les mécanismes et la performance de sûreté de fonctionnement d'un système ne seront pas altérés par les changements (besoins utilisateurs ou logiciels d'application), les variations imprévues de l'environnement et les évolutions du système pendant la vie opérationnelle, y compris les effets collatéraux du vieillissement de composants. Ces changements sont le plus souvent difficiles à prévoir lors de la conception du système.

Les « mises à jour » des systèmes durant leur vie opérationnelle doivent être effectuées rapidement pour des raisons techniques (maintenance) et économiques (limitation des durées d'immobilisation). Elles doivent souvent être effectuées « à distance » comme c'est particulièrement le cas pour les satellites, mais aussi pour les systèmes embarqués automobile pour lesquels la mise à jour dites : « over-the-air » devient aujourd'hui un réel challenge.

La persistance de la sûreté de fonctionnement lors de changements au cours de la vie opérationnelle, non prévisibles initialement, impose une capacité d'intervention qui n'altère pas la « qualité » des logiciels. Un large domaine de recherche en ingénierie logicielle traite de concepts, outils, méthodes et bonnes pratiques pour concevoir et développer des logiciels dits « adaptatifs ». Les approches de développement de logiciels agiles mettent aussi l'accent sur l'importance de permettre les changements à un coût raisonnable durant la vie de l'application, plutôt que de chercher à anticiper un ensemble d'exigences exhaustives.

A titre d'illustration des recherches dans le domaine, le LAAS (voir Réf 2.6 *Jean-Charles Fabre,* LAAS-CNRS) développe des approches de *conception de systèmes pour l'adaptation* mettant en jeu des mécanismes internes à la sûreté de fonctionnement à base de composantes élémentaires (briques logicielles), l'adaptation aux changements consistant alors essentiellement en une modification de la combinaison des éléments. Les approches s'appuient sur les technologies d'ingénierie du logiciel basées sur les composants (Component based Software Engineering) pour traiter de l'adaptation en ligne des

mécanismes de tolérance aux fautes (AFT- Adaptive Fault Tolerance). Elles reposent sur deux facteurs clés :

- conception de mécanismes de tolérance aux fautes permettant ces adaptations et,

- mise en œuvre d'un « middleware » pour les mises à jour du logiciel durant son exécution en temps-réel.

Vérification, Validation et Certification des systèmes

La recherche d'autonomie est une tendance irréversible pour la maitrise de systèmes de plus en plus interconnectés. Aujourd'hui dans l'aéronautique, l'automatisation concerne typiquement, outre les fonctions basiques du pilotage : la navigation autonome, la protection des limites du domaine de vol et l'évitement d'obstacles, les systèmes de conditionnement, de pressurisation et de gestion du carburant, le management des redondances, certains contrôles internes aux moteurs ...

Les futurs systèmes devraient inclure la capacité de management au niveau mission.

De nouvelles approches de la Vérification, Validation et Certification devront être développées pour l'automatisation mais aussi pour la répartition et les relations entre acteurs. Ces approches devront éviter l'écueil des coûts exorbitants.

A titre d'exemple, une approche globale dérivée des méthodes d'évaluation et de qualification des opérateurs humains est proposée par *Michael Francis* (voir Réf 2.12 *Dr Michael Francis*, UT Research center). Elle consiste en une évaluation et une qualification globale de l'ensemble Homme-machine. Dans cette approche, les attributs des logiciels intelligents devraient alors inclure :

- un langage de communication certifié

- la capacité d'articuler et d'expliciter la chaine de perception et de décision.

- une interface permettant une intégration étroite entre humain et machine en cours d'opérations

- une interface permettant une compréhension détaillée du comportement de la machine par les experts du monde aéronautique

SYNTHESE et PERSPECTIVES

Les efforts de recherches, études et développements doivent permettre d'améliorer particulièrement la maitrise du pilotage lors des situations critiques. La compréhension du comportement humain est en progrès constant. Les recherches visant à augmenter les fonctions de la machine doivent inclure impérativement : la reconnaissance de tendances potentiellement révélatrices d'évolutions vers un état critique de l'avion dans son environnement, l'évaluation des ressources résiduelles de l'avion en cas de perte de fonctions de détection ou de contrôle, le maintien autant que possible des sous fonctions de pilotage automatique, l'aide au repérage spatial…

Les freins à l'automatisation doivent être levés pour la mise en œuvre de protections enveloppes des vols afin de faire face aux menaces telles que le terrorisme, le suicide ou la défaillance des pilotes pour lesquelles les protections actuelles sont insuffisantes ou parfois sources de nouvelles vulnérabilités (cloisonnement du cockpit par exemple). Les recherches relatives aux vols de plus en plus autonomes, de façon exceptionnelle ou nominale sont importantes à divers titres.

L'évolution du système de transport aérien vers plus d'interconnexions et d'interactions, pour faire face notamment à l'augmentation et à la diversification du trafic, doit être préparée au moyen de recherches multidisciplinaires qui bénéficieraient d'une plus large mutualisation avec d'autres domaines d'applications critiques et d'une relation plus étroite entre industriels, organisations étatiques et laboratoires de recherche.

Les éléments clés de la maitrise de la complexité des futurs systèmes de transport aérien sont notamment les techniques, outils et méthodologies pour l'évaluation des binômes « humain-machine », pour l'ingénierie et pour le développement industriel des logiciels et des systèmes.

L'intérêt de l'utilisation accrue des liens de télécommunications ouvrira naturellement la porte à une évolution potentielle vers le pilotage avec un seul pilote à bord. Les recherches portant sur la caractérisation des défaillances physiologiques et leur détection doivent être impérativement menées avant de définir précisément les conditions d'un tel pilotage.

Références

1 Livrets rédigés par les Membres de la Commission Aviation Civile de l'Académie de l'Air et de l'Espace

1.1 Jean Broquet et Xavier Champion, Sécurité actuelle et objectifs d'améliorations

1.2 Pierre Calvet, Considérations générales sur les automatismes et leur histoire

1.3 Jean-Claude Ripoll, La transition cybernétique du transport aérien de passagers, une approche théorique élémentaire et philosophique.

1.4 Jean Pinet, Faut-il des pilotes à bord ?

1.5 Jean Broquet, Approche analytique des évolutions du pilotage à l'horizon 2050

1.6 Alain Joselzon, Apport de l'expérience des drones

1.7 Gérard Rozenknop, Dominique Colin de Verdière, Luc Deneufchatel, Patrick Dujardin, Laurent Barthélemy, ..., L'environnement de l'avion connecté

1.8 Jean Broquet, Domaines clés d'études et recherches

2 Présentations lors du colloque à Toulouse les 1 &2 juin 2016 à Toulouse France " Le transport aérien sera t'il tout automatique en 2050 » ?

2.1 Bruno Nouzille, Thales, *Les études de réalisations futures sur la gestion des vols/inter connectivité chez Thales*

2.2 Bernard Rontani, Airbus, *Les études de réalisations futures chez Airbus*

2.3 Frédéric Falchetti, Dassault Aviation, *Les études de réalisations futures chez Dassault Aviation*

2.4 Concevoir de nouveaux systèmes homme-machine : un défi pour les ingénieurs, par Stéphane Chatty, ENAC

2.5 Un exemple de réalisation d'automatisme avancé : Rafale, par le Colonel Damien Rouillé, Armée de l'air française

2.6 De la sûreté de fonctionnement à la résilience : vers une tolérance aux fautes adaptatives, par Jean-Charles Fabre, LAAS-CNRS

2.7 Le progrès des prévisions météorologiques pour l'aviation, par Jean-Louis Brenguier, Coordination de la R&D Météo-France pour l'aviation, Météo-France

2.8 Points de vue juridiques, par Sophie Moysan, La Réunion Aérienne et la Réunion Spatiale

2.9 Méthodes d'évaluation du binôme humain-automate, par Michael Feary, NASA Ames

2.10 Intégration « Homme-Système », par Guy Boy, FIT, AAE

2.11 Nouvelle répartition des rôles entre Contrôle de la circulation aérienne, Centre de contrôle des opérations et pilotes, par Eric Hoffman, Air Traffic Services R&D, ATM Directorate

2.12 Vérification, validation & certification des systèmes d'intelligence artificielle, par Dr Michael Francis, UT Research center

2.13 Le pilote a t'il tout sous contrôle ? Comment doit-il gérer les imprévus dans des cockpits hautement automatisés? par Arjan Lemmers, NLR

2.14 Du robot à l'avion automatisé : quelles préconisations pour une automatisation raisonnée ? par Catherine Tessier, ONERA

2.15 Le pilote dans tous ses états (attentionnels), par Frédéric Dehais, ISAE

2.16 Point de vue d'un ancien pilote de ligne, chercheur et actuellement enquêteur pour la sécurité aérienne, par Robert Sumwalt, NTSB

2.17 L'exemple du nEUROn, par Frédéric Falchetti, Dassault Aviation

2.18 Besoin de formation des opérationnels, par Philippe Crebassa, ENAC

3 US National Research Council, Committee on autonomous research for civil aviation, 2014: **Autonomy Research for Civil Aviation: Toward a new era of Flights**

4 AIAA Intelligent Systems Technical Committee, First Edition June 2016; Report on **Roadmap for intelligent systems in Aerospace**

Livret 9 : SYNTHÈSE des CONDITIONS à REMPLIR pour la RÉUSSITE des ÉTAPES vers plus d'AUTOMATISME

Dominique CHATRENET (Expert invité)

Hugues SUBRA de SALAFA (Expert invité)

Introduction

Divers scénarios ont été envisagés quant à la composition des équipages :

- Scénario 1 : deux pilotes au poste de pilotage comme aujourd'hui ; extension des fonctionnalités des automatismes.
- Scénario 2 : pour les long-courriers, deux pilotes au poste pour le décollage et à l'atterrissage, un seul pilote au poste en croisière (SPC Single Pilot in Cruise) ; avec support pilote au sol en croisière.
- Scénario 2bis : comme scénario2 mais sans support pilote au sol en croisière.
- Scénario 3 : un seul pilote à bord (SPO Single Pilot Operation) court- et moyen-courrier ; avec support pilote au sol.
- Scénario 4 : un seul pilote à bord (SPO) tous courriers ; avec support pilote au sol.
- Scénario 5 : un seul pilote à bord (SPO) tous courriers ; sans support pilote au sol.
- Scénario 5bis : pas de pilote à bord, pilote au sol. **Ce dernier est jugé comme non atteignable 2050 pour le transport commercial des passagers.**

La synthèse présentée ici est organisée en fonction de leur pertinence vis-à-vis des scénarios de composition d'équipage. Afin de simplifier et clarifier cette synthèse, nous considèrerons les familles suivantes :

- équipage composé de deux pilotes à bord, comme c'est le cas aujourd'hui en court et moyen-courriers, mais étendu aux vols très long-courriers ; cette famille recouvre les scénarios 1, 2 et 2bis
- équipage composé d'un seul pilote à bord (SPO Single Pilot Operation) avec support d'un pilote au sol ; cette famille recouvre les scénarios 3 et 4
- équipage composé d'un seul pilote à bord (SPO), sans support au sol ; c'est le scénario 5.

Le tableau 1 ci-après illustre les étapes (ou scénarios) possibles d'évolution. Établi comme une progression logique allant dans la direction d'un rôle accru des automatismes, il montre comment la "fonction" pilote, au cœur de l'activité, pourrait être affectée. Le tableau 2 montre les incidences principales des différents scénarios sur les fonctions mises en œuvre.

Tableau 1 Scénarios possibles d'évolution

Scénarios / **Pilotes**	**Scénario 1**	**Scénario 2**	**Scénario 2bis**	**Scénario 3**	**Scénario 4**	**Scénario 5**	**Scénario 5bis**
Pilote à bord **(PB)**	**Comme aujourd'hui avec extension du vol en tout automatique**	**Long-courrier (LC) :** 2PB au décollage, Appr/Atterr ; Un seul pilote en croisière (SPC) **(pas de 3e PB)**	**Long-courrier (LC) :** 2PB au décollage, Appr/Atterr ; Un seul pilote en croisière (SPC) **(pas de 3e PB)**	**Court/moyen-courrier (C/MC) : 1PB avec aéroport de** déroutement à moins de Xmn	**1PB pour tous courriers :** - pour C/CM idem Sc.3 - pour LC quand PB au repos le PS prend le contrôle de l'avion	**1PB pour tous courriers** - pour C/CM idem Sc.3 - pour LC PB au repos en croisière	**0 PB** (Rôle de commandant de bord à déterminer)
Pilote au sol (**PS**)	**PS** pas nécessaire	**PS** surveille (monitor) en croisière. Temps de réaction pour prise en main efficace =10mn)	**Pas de PS**	**PS** surveille pendant tout le vol pour C/MC (temps de réaction = 10mn)	**PS** pour tous les vols (temps de réaction ~10mn mais 2mn quand le PB est au repos)	**Pas de PS**	**PS pour tous les vols** (repos par 2e PS pour LC)

Tableau 2 : Incidences principales des différents scénarios sur fonctions mises en œuvre

Fonctions \ Scénarios	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 2bis	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5	Scénario 5bis
Système d'évitement en vol des autres avions et du sol	Alerte comme aujourd'hui + en option Sc.2 (et suivantes)	Agit directement sur la trajectoire de l'avion pour manœuvre d'évitement à moins que le pilote en fonction refuse.					
Météo	Met à jour en permanence les prévisions météorologiques vers le contrôle de la circulation, le CCO et les pilotes. Recommande changement de trajectoires en cas d'événements dangereux. Améliorations permanentes pour optimiser le terme des prévisions en fonction des phases de vol.						
Communications	Idem aujourd'hui	Transmission permanente des paramètres principaux de vol au PS pendant la croisière. Si incapacitance PB en fonction en croisière transmission au PS de données complétées dans un délai de 1 min **(attention à la distance!)**		Idem Sc.2 pour toutes les phases de vol.	As S3 pour toutes missions + Pour LC transmet données complètes de vol en permanence pendant que le PB est au repos **(attention à la distance!)**	Transmission des paramètres essentiels de vol disponible pour le contrôle de la circulation aérienne **(attention à la distance!)**	Transmet au PS les données complétées de vol en permanence **(attention à la distance!)**
Conception du cockpit	Comme aujourd'hui avec simplification des logiques d'apparition des paramètres en cas d'évolution rapide de la situation du vol. **Pilotage essentiellement par objectifs plus que par paramètres.**			**Nouvelle conception du cockpit avec moins de commandes et indications permanentes et davantage de moyens automatiques de communications + introduction du sélecteur de secours ultime.**			Rôle du cockpit à revoir fondamentalement.
Remarques	Poursuite des recherches recommandées dont relevé systématique des cas imprévus afin d'établir une banque de données servant à assurer la robustesse des automatismes du futur	Partage des responsabilités à bien établir	Idem Sc.2	Comment former les pilotes ? simulateurs +en vol garder place à instructeur/ examinateur même en commandes simplifiées	Idem Sc.3 Le pilote devient davantage un observateur	Scénario très difficile à atteindre en 2050 pour des questions de temps de démonstration de la fiabilité des automatismes	Scénario jugé d'atteinte impossible en 2050

Recommandations applicables aux AVIONS et OPERATIONS avec équipage composé de DEUX PILOTES

Court / moyen-courriers et long-courriers sans équipage renforcé

Il s'agit de la composition actuelle des équipages, qui serait supposée maintenue à l'horizon 2050 au moins avec des avions du type de conception du poste de pilotage actuel. L'application accrue des automatismes est alors justifiée par l'amélioration visée de la sécurité (voir Livrets 1, 4 et 5) et celle de l'efficacité du système de transport aérien (coûts d'exploitation ou d'acquisition, empreinte environnementale, croissance du trafic, ponctualité, etc.).

Recommandations sur le plan humain

- Pour améliorer encore davantage la coopération entre l'homme et les automatismes, il faut poursuivre les études de neurologie appliquée, neuropsychologie et neuro-ergonomie de façon à parfaire la connaissance du fonctionnement de l'opérateur humain, non seulement en cas de crise (accident), mais aussi dans le cas de fonctionnement nominal du cerveau. D'avantage de coopération entre neuropsychologues, ingénieurs concepteurs et opérationnels est souhaitable.

- Pour permettre de faire progresser ces connaissances, il est recommandé de recueillir, constituer en bases de données chiffrées, quantifiées, et analyser, les données de tous les vols, présentant les situations « banales » où l'homme intervient de façon positive par opposition aux cas critiques et très rares ou la sous-performance de l'homme a pu être mise en évidence. Les automatismes devraient couvrir la majorité de ces situations banales.

Recommandations sur la rationalisation et l'extension des automatismes

- Dans l'évolution irréversible vers plus d'automatisme, appliquer lors de la conception le principe de laisser faire à l'humain et aux automatismes ce que chacun peut faire mieux que les autres, en sécurité et efficience. Par exemple, donner à l'homme d'avantage d'informations pour lui permettre de prendre la décision d'effectuer une remise des gaz ; confier aux automatismes l'enchaînement et l'exécution des tâches élémentaires de cette remise des gaz, telles l'application progressive de la poussée nécessaire, la rétraction du train et des dispositifs hypersustentateurs, le contrôle de la trajectoire et de la vitesse.

- Rationaliser et étendre les automatismes de pilotage en développant des architectures telles que la Fonction Pilote Automatique (PA) soit toujours disponible pour le pilote (PA permanent), fût-ce avec des fonctionnalités minimales (maintien d'altitude, de cap et de vitesse). L'objectif est ici de supprimer « l'effet de falaise » constaté parfois aujourd'hui lors de la reprise en main par le pilote humain en cas de panne.

- Le pilotage manuel conventionnel, nécessitant connaissance et anticipation des réactions naturelles de l'avion ainsi qu'«adresse/habileté de pilotage », doit évoluer vers la désignation d'objectifs de trajectoire. Faire évoluer les organes de pilotage vers des désignateurs d'objectifs dont l'usage doit être ergonomique, instinctif, précis et robuste à l'environnement du cockpit.

- Améliorer l'interface entre l'homme et ce Pilote Automatique de façon à rendre plus instinctive la compréhension par le pilote des intentions présentes et futures du Pilote Automatique.

- Inclure dans ce Pilote Automatique permanent des protections contre les sorties du domaine de vol, contre les collisions avec d'autres avions, contre les collisions avec le relief ou la surface de l'eau.

- Mieux définir les conditions dans lesquelles l'autorité humaine à bord pourra être déniée par la machine (protection automatique du domaine de vol étendue à la protection préventive contre les comportements incohérents ou dangereux de l'humain opérant dans le cockpit à un moment donné).

Recommandations sur la fourniture d'informations pertinentes à la disposition de l'équipage dans toutes les phases de vol

- Lors de la préparation du vol ou de sa replanification en l'air dues à diverses causes (compagnie, contrôle de la navigation ou aéroportuaire, météo, anticipation de certains scénarios de panne), faciliter le travail du pilote à bord en lui transmettant les données appropriées ou des plans de vol préparés ou modifiés au sol.

- Faciliter le traitement mental, cognitif, des situations d'évolution rapide par diminution du nombre d'informations à traiter, en s'appuyant sur des présentations synthétiques directement utilisables:

- pilotage : permettre au pilote de mieux identifier, sans besoin de recherche et de façon plus intuitive, les reconfigurations et modes des automatismes
- navigation : développer les figurations 3D, y incorporer la vision synthétique, de façon à améliorer la perception rapide par le pilote de la situation de son avion dans l'espace
- état des systèmes : améliorer la présentation en cas de pannes multiples affectant simultanément de nombreux systèmes. Présenter d'abord une analyse synthétique de la situation privilégiant la connaissance des fonctions qui restent opérationnelles et l'identification des actions nécessaires les plus urgentes.
- vision : développer la fusion des visions directes, augmentées (ex infrarouge) et synthétiques (base de données terrain et position/assiettes avion) ; superposition permanente en vision tête haute des paramètres de vol et des intentions/consignes du Pilote Automatique
- améliorer encore la présentation de la situation de l'avion dans le domaine de vol lorsqu'il s'approche des limites, ou qu'il les dépasse ; en particulier, les limites aérodynamiques, incidence, dérapage, survitesse
- présenter la situation à l'équipage sur le plan énergie durant l'approche, en lui montrant une prévision des points d'impact et d'arrêt sur la piste. (On notera que le développement est en cours : cela devrait se traduire par une réduction du nombre des sorties de piste mais pourrait aussi entrainer une légère augmentation du nombre de remises gaz tous moteurs en fonctionnement. Il est alors souhaitable d'améliorer le niveau actuel de sécurité de cette manœuvre, surtout pour les bimoteurs. La généralisation de la remise de gaz automatique à poussée adaptée et reconfiguration automatique des dispositifs hypersustentateurs et du train d'atterrissage répond à ce souhait.

- Améliorer la fiabilité des informations nécessaires au bon fonctionnement des automatismes (redondance, dissemblance, algorithmes de vraisemblance, fusion de données) ; c'est surtout applicable aux informations anémométriques, aux altitudes par rapport au sol, aux informations nécessaires à l'atterrissage automatique systématique, et dans une moindre mesure aux informations inertielles.

Recommandations sur l'introduction de nouvelles fonctions

- Définir un mode sauvegarde : appliquer sur les avions civils des modes de récupération (« recovery mode ») existant sur les avions militaires en cas de mise de l'avion dans des situations/positions

extrêmes inusuelles malgré les protections incorporées dans le pilote automatique. Le mode de mise en sauvegarde « instantanée » doit assurer une remise en conditions de vol stables sur action simple du pilote. Et dans le cas d'absence de mise en mode sauvegarde par le pilote, (par exemple cas de « Lack of positionnal awareness in flight » et persévérance dans une représentation fausse) envisager un passage automatique en mode sauvegarde.

- Développer, améliorer, généraliser les fonctions automatiques d'évitement des collisions, que ce soit avec d'autres aéronefs ou avec le sol. Exploiter pour ce faire les ressources de l'interconnexion et des bases de données. Définir les rôles/autorités respectifs du pilote humain et de l'automatisme pour le déclenchement des manœuvres d'évitement.

Recommandation pour l'amélioration du recueil des données de vol

Le contexte général d'amélioration visée de la sécurité du transport aérien ne peut plus s'accommoder d'accidents inexpliqués pour cause de non récupération des données enregistrées à bord. Il est donc recommandé de mettre en place le système global d'émission, de transmission, de collecte et d'enregistrement au sol des données de vol permettant d'analyser et comprendre les circonstances des accidents. Pour des raisons prévisibles de limitation de bande passante, l'émission doit vraisemblablement être conditionnée à la détection de conditions anormales (généralisation à tous les paramètres des enregistreurs de ce qui commence à se mettre en place pour la position de l'avion)

Recommandations sur la météorologie

La meilleure connaissance à bord des conditions météorologiques le long de la trajectoire du vol est un élément d'amélioration de la sécurité, de l'efficacité et du confort du transport aérien. A ce titre il est recommandé :

- d'améliorer la fusion des données météorologiques de sources diverses et multinationales
- d'utiliser les avions comme sources de données (capteurs volants), de faire redescendre ces données vers le sol et de les fusionner avec les précédentes
- de faire remonter en temps réel vers les avions la situation météorologique fusionnée le long de la trajectoire de vol et des déroutements possibles
- d'améliorer la prévision des phénomènes potentiellement menaçants : activité convective intense, givrage basse et haute altitude, Turbulence de Ciel Clair (CAT)
- communiquer cette prévision en temps réel au pilote pour permettre soit d'éviter la zone soit de prendre les mesures permettant d'en réduire les effets néfastes sur le vol ou les passagers.

Recommandations sur la validation des systèmes

- Améliorer, développer et mettre en place de nouvelles façons de spécifier, développer et valider des systèmes de complexité accrue, interfacés avec l'opérateur humain.

L'objectif est double : éviter/éradiquer les déficiences humaines dans les automatismes de complexité croissante et spécifier, développer et valider la conception et les protocoles d'opération et de coopération, au vu des exigences et principes du type Facteurs Humains.

Pour ce faire :

- Dresser des catalogues de cas normaux et exceptionnels basés sur l'expérience et son extrapolation, en se dotant des moyens de valider les situations de coopération bord /centre de contrôle du trafic aérien/météo/CCO.
- Dans un contexte de développement de l'usage des algorithmes dits d'«Intelligence Artificielle », mener une réflexion parallèle sur les méthodes et moyens à utiliser pour en assurer la validation. C'est un préalable nécessaire avant d'en envisager l'application à des fonctions critiques d'un point de vue sécurité.
- Etendre les moyens de simulation, (l'interconnexion de moyens de simulation doit être davantage développée et son usage généralisé), les faire tourner en accéléré, mélanger des

scénarios à tester prédéfinis et des scénarios aléatoires, exposer les automatismes à des testeurs « malveillants » incités à débusquer la faille (sorte de « hackeur » des automatismes à valider).

Très long courriers

Nous envisageons ici des vols de typiquement plus de 8 heures avec un équipage composé seulement de deux pilotes. Les phases de décollage, montée, descente, approche et atterrissages sont effectuées avec les deux pilotes au poste. Pendant la croisière, chacun des pilotes irait à tour de rôle prendre un temps de repos dans une couchette/espace de repos spécifiquement aménagée (et avec accès rapide et sans entrave vers le cockpit). Le pilote non au repos est alors seul dans le cockpit (SPC : Single Pilot in Cruise). En cas d'évènement imprévu, le pilote au repos est réveillé et rejoint son collègue dans le cockpit. Le temps écoulé entre le déclenchement du réveil du pilote au repos et sa capacité à analyser et faire face à la situation est estimé à 15mn.

Nota : ce scénario est différent de ce qui se pratique déjà aujourd'hui sous le nom de « nap ». Il est en effet autorisé qu'en croisière, l'un des pilotes au poste « somnole » tout en restant assis dans son siège.

Les recommandations que nous formulons sont toutes celles déjà énoncées pour le cas d'équipage à deux sur court et moyen-courrier (voir paragraphe 9.1.2), auxquelles il faut ajouter les recommandations supplémentaires nécessaires pour rendre ce scénario envisageable. En effet il devient nécessaire de détecter toute perte de capacité physiologique totale ou partielle du pilote seul au poste et d'assurer l'autonomie et la sécurité du vol pendant la période nécessaire au pilote au repos pour reprendre le contrôle du vol.

Recommandations pour la conception

- Concevoir des aménagements permettant un repos efficace, des moyens de communication et un accès rapide et sans entrave au poste.

- Développer des systèmes de surveillance des activités du pilote en fonction de façon à détecter :

  - la plupart des déficiences humaines,
  - l'hypovigilance et la somnolence,
  - les pertes de capacité physiologique partielle,
  - les pertes de capacité physiologique totale.

- Affiner le besoin minimum d'autonomie sûre de l'avion en croisière (Pilote Automatique et ses protections) en tenant compte du délai nécessaire pour le pilote au repos avant de reprendre le contrôle de la situation)

Recommandations organisationnelles

- En complément, définir la supervision exercée par le sol (CCO) ou d'autres opérateurs humains (équipage commercial, contrôle du trafic aérien, etc.). Affiner le besoin de fréquence de cette supervision.

- Mettre au point les protocoles opératoires pour réguler le repos du second pilote

Recommandations applicables aux AVIONS et OPERATIONS avec équipage composé d'UN SEUL PILOTE à bord, AVEC support d'un PILOTE au SOL

Dans cette famille de scénarios, on envisage les avions opérés par un seul pilote à bord, celui-ci bénéficiant grâce à une connectivité adéquate du support d'un pilote au sol. L'ensemble des automatismes de bord et au sol, l'organisation interactionnelle des acteurs, les moyens de communication doivent permettre d'assurer les tâches aujourd'hui dévolues à bord au second pilote, à savoir :

- assurer la terminaison sûre du vol en cas « d'incapacitation physiologique » du premier pilote
- assurer la prise en charge de tâches de façon à rendre compatible la charge de travail de tous les jours avec les capacités d'un seul homme
- assurer la surveillance (monitoring) des actions du pilote en fonction

Notons qu'en cas d'incapacitation totale et irréversible du pilote à bord, c'est le pilote au sol qui conduit l'avion à destination, après une phase courte d'autonomie complète nécessaire à ce pilote au sol pour prendre pleine connaissance de la situation et l'analyser. Il est aussi vraisemblable que ce scénario ne peut avoir de sens économique que si plusieurs vols simultanés peuvent être suivis par un seul et même pilote au sol. Enfin, gardons à l'esprit que ces cas de reprise en main nécessaire par le sol resteront de fréquence très faible et que le défi de ce scénario sera plus vraisemblablement posé par des « incapacitations partielles » et/ou temporaires du pilote à bord, non déclarées par ce dernier.

Un effort préalable de recherche visant à l'amélioration de la sécurité du pilotage dans le cadre de scénarios avec un seul pilote à bord est nécessaire.

Il devra permettre :

- de caractériser les liens statistiques entre les performances individuelles et collectives des pilotes et chacune des causes d'accidents, à partir d'une densification des relevés de performance du pilotage lors des vols opérationnels

- de caractériser les performances individuelles des pilotes, y compris dans les situations de stress, à partir de relevés lors de vols opérationnels avec un seul pilote à bord

- de caractériser les probabilités associées aux défaillances physiologiques et aux pertes de performances des pilotes, et de tester divers moyens de détection,

- de poursuivre les développements et les tests de démonstrateurs de vols autonomes.

Par ailleurs pour analyser l'intérêt économique d'une évolution potentielle vers un pilotage avec un seul pilote à bord, il sera nécessaire d'explorer les schémas d'organisation globale des supports sols, et au préalable :

- analyser les forces et faiblesses potentielles d'une coopération entre pilotes, l'un à bord l'autre au sol,

- confirmer les délais et latences acceptables pour les télécommunications,

- évaluer la capacité des opérateurs/pilotes sol à intervenir de façon séquentielle en support de différents vols selon le type d'organisation retenu.

Les recommandations que nous faisons afin de rendre ces scénarios envisageables à l'horizon 2050 sont toutes celles mentionnées au paragraphe précédent, complétées par les recommandations suivantes :

Court / moyen-courriers et long-courriers

Recommandations sur le plan humain

- Poursuivre les études et recherche en neuropsychologie de façon à mieux comprendre, appréhender et quantifier les cas de « d'incapacitation totale ou partielle » du pilote. Poursuivre l'analyse systématique des vols avec cette grille de lecture. Etendre cette analyse aux vols d'affaires et ceux des avions de moins de 19 places qui sont assurés par un seul pilote.

- Analyser les mécanismes de prise de conscience des situations et la capacité à reprendre le contrôle du vol afin d'affiner les besoins minima de la durée d'autonomie totale de la machine

- Entreprendre les activités de recherche et les expérimentations afin d'explorer de façon extensive les divers aspects de la coopération entre pilote à bord et pilote au sol. Définir les compétences et le profil idéal du pilote au sol (confirmer qu'il s'agit d'un pilote expérimenté). Préciser et confirmer l'aide que peut apporter le pilote au sol quand le pilote à bord éprouve des difficultés à comprendre une situation ou un comportement de la machine et de ses automatismes.

- Réfléchir dès maintenant à une nouvelle approche de la carrière de pilote de ligne : besoins de formation, nouveaux critères de sélection incluant la maîtrise de soi et la résistance au stress, comment deviendrait-on Commandant de Bord, comment assurer l'attribution des postes de pilote au sol (alterner les fonctions vol et sol ? plus grande expérience des pilotes au sol ?). Anticiper une longue période de transition au cours de laquelle cohabiteraient des avions à deux pilotes et des avions à un seul pilote.

Recommandations pour la conception des avions

- Développer des robots de surveillance des actions du pilote en fonction, de façon à détecter les pertes de capacité physiologiques totales ou partielles non déclarées/reconnues par le pilote

- Développer des robots de surveillance des actions du pilote en fonction, de façon à détecter la plupart des déficiences (incluant les erreurs) humaines d'origine non physiologique.

- Développer des démonstrateurs d'avion télé-piloté par un pilote sol pour l'achèvement d'une mission. Affiner les études d'analyse de sécurité des systèmes mis en œuvre en fonction de la probabilité d'avoir à effectuer cette reprise en mains. Affiner cette dernière probabilité.

- Soulager la charge de travail du pilote à bord en développant les automatismes de contrôle automatique de configuration tels que mouvement du train d'atterrissage, des becs et volets, commande intégrée moteurs/aérofreins/freinage/reverse, équilibrage de la panne moteur… Simplifier la sélection des fréquences radio, simplifier l'exécution d'une remise des gaz.

- Anticiper l'agencement d'un cockpit adapté. Ce cockpit devra être compatible d'une période de validation en vraie grandeur du concept mono-pilote au cours de laquelle un deuxième pilote sera maintenu, ainsi que des procédures de contrôle et évaluation en vol des pilotes.

- Mettre en place des moyens de validation interconnectés pour valider l'ensemble des systèmes, des protocoles et des communications dans le cadre de la coopération entre le bord et le sol (simulateurs avion/CCO /ATC interconnectés)

Recommandations sur les moyens de communication

- Affiner les besoins en matière :

  - de débits nécessaires de et vers l'avion, en distinguant le cas nominal (simultané pour tous les avions) et exceptionnel en situation de crise (théoriquement simultané pour seulement un nombre limité d'avions)
  - de temps de réponse (latence), en distinguant la croisière des zones terminales
  - de fiabilité (en fonction des phases de vol et des zones, définir le besoin de redondance)
  - de sécurité (cryptage adapté à la confidentialité des informations, mesures contre la cybercriminalité)

- Préserver si nécessaire les allocations supplémentaires de bande de fréquences, ce qui pourrait s'avérer extrêmement difficile

- Mettre en place en temps voulu le (ou les) réseau(x) mondial(iaux) de communication nécessaire(s) et l'organisation des fournisseurs de service associés.

Recommandations pour l'organisation des Compagnies Aériennes et de leurs CCOs

- Définir des protocoles de surveillance exercée de façon échantillonnée par le pilote au sol
- Définir les moyens de suivi des vols nominaux. Définir le nombre de vols pouvant être suivis en parallèle par un pilote sol. Ne pas négliger la grande variété des types d'avions et de leurs versions. Affiner les hypothèses de probabilités émises dans le chapitre 5 pour définir le nombre permanent minimum de pilotes au sol pour une flotte donnée. Ne pas oublier les cas de répartition non homogène des besoins d'intervention ou surveillance par le CCO (flotte avec grande densité de décollages ou d'atterrissages à certaines heures).
- Définir la meilleure articulation entre suivi sol par CCO centralisé pour les phases non aéroportuaires, et suivi sol par centre localisé à proximité des aéroports pour les phases de décollage, montée initiale, approche et atterrissage (ou bien par CCO centralisé de bout en bout de la mission).
- Définir le protocole d'organisation du CCO en cas d'intervention nécessaire exceptionnelle : allocation vraisemblable de deux pilotes sols dédiés au vol dont il faut assurer l'achèvement sans pilote à bord. Envisager aussi la contribution possible d'un membre de l'équipage commercial lors de cette phase.
- Définir le cas échéant les conditions et le protocole de reprise en main par le pilote bord en cas « d'incapacitation temporaire » et réversible.
- Enfin prendre en considération des scénarios exceptionnels tels que la fermeture de l'espace aérien Américain lors du 11 septembre 2001, ou des catastrophes naturelles majeures perturbant de façon significative et imprévisible tout le trafic aérien d'une région. Imaginer des mutualisations de services entre plusieurs compagnies de taille modeste opérant le même type d'avions.

Recommandations pour le Contrôle du Trafic Aérien

- On peut rappeler qu'aujourd'hui, avec deux pilotes à bord, la tâche de communication avec le contrôle aérien, dévolue au « Pilot Monitoring », est très élevée dans les espaces aériens denses comme les grandes zones terminales. Il est donc impératif de développer tous les moyens techniques (par exemple mélange optimal de messages vocaux et numériques) et organisationnels (simplification...) propres à réduire cette charge de travail avant d'envisager le passage à un seul pilote à bord.
- Anticiper l'incorporation dans le trafic d'avions télé pilotés par un pilote sol (cas demeurant cependant rares).
- Mettre au point les procédures permettant d'assurer le contrôle et l'incorporation dans le trafic d'avions pilotés par un pilote localisé au sol ou opérant temporairement de façon autonome dans les cas rares d'incapacité du pilote à bord.
- Dans le « triangle » avion/CCO/centre de contrôle du trafic aérien, préciser les conditions de communications directes CCO /centre de contrôle du trafic aérien (pour le cas d'achèvement du vol en télé pilotage, mais aussi pour le cas de tous les jours).

Recommandations pour la prise en compte de l'expérience des drones

L'expérience des drones, dont le développement significatif est anticipé d'ici 2050, devra être soigneusement analysée et prise en compte. C'est particulièrement pertinent pour les scénarios à un seul pilote à bord en cas de reprise en main par le sol. Si les recommandations énoncées dans le Livret 6 sont suivies, alors le développement des drones aura permis d'expérimenter et de valider des solutions transposables aux situations « d'incapacitation » du seul pilote à bord comme par exemple l'optimisation du poste de commande de l'opérateur au sol, les procédures d'insertion de cet avion dans le trafic aérien, la protection de l'interconnexion contre la cybercriminalité.

Très long courriers

Dans ce scénario, il existerait de longues périodes de croisière au cours desquelles le seul pilote à bord serait au repos ; pendant ces périodes, le cockpit serait donc « inoccupé » et l'avion évoluerait de façon autonome et sous la surveillance du pilote au sol.

Recommandations

Toutes les recommandations exposées précédemment sont applicables, en insistant particulièrement sur les aspects communications et CCO. Nous pensons devoir mentionner deux recommandations supplémentaires spécifiques :

- Préparer le monde des passagers à accepter « l'absence » d'être humain au poste de pilotage pendant de longues périodes de croisière (envisager des moyens de substitution par membre d'équipage commercial, par intervention régulière du pilote sol, par pilote virtuel ?)
- N'envisager le déploiement de ce scénario qu'après avoir accumulé une expérience satisfaisante et suffisante avec l'opération décrite au paragraphe 3.1 (mono-pilote en court courrier, moyen- courrier et long courrier sans équipage renforcé). L'échéance de 2050 peut alors être marginale.

Recommandations applicables aux AVIONS et OPERATIONS avec équipage composé d'UN SEUL PILOTE à bord, SANS support d'un PILOTE au SOL

Ce scénario est considéré comme très difficilement atteignable pour le transport commercial des passagers à l'horizon 2050 en conséquence de l'analyse faite dans le chapitre 5 qui montre que sans présence d'un pilote au sol, les objectifs d'amélioration de la sécurité du transport aérien tels que fixés au livret 1 ne pourraient être atteints.
Au-delà de l'horizon 2050, il pourra être envisagé si le développement éprouvé des automatismes est capable de procurer à l'avion un degré d'autonomie permettant d'assurer l'achèvement sûr du vol sans intervention humaine. Cependant et en dehors des cas exceptionnels « d'incapacitation », nous pensons qu'à l'horizon 2050, un pilote seul à bord face à des automatismes de complexité croissante peut tirer bénéfice de l'avis d'un second opérateur humain au sol….

Conclusion

Il est difficile de prévoir quel scénario se dégagera et qui n'émergera probablement que progressivement au fur et à mesure des développements. Comme aujourd'hui le TA se trouvera en situation de changement permanent, avec des solutions qui pourront dépendre des conditions locales ou régionales. L'intérêt des divers scénarios sera évalué par les clients opérateurs à partir d'études réalisées par les constructeurs-développeurs, les opérateurs eux-mêmes, les services de contrôle de la navigation, les prestataires de services et bien sûr les régulateurs. Il est certain que des raisonnements de blocage « a priori » verront le jour du fait de l'approche conservative inhérente à l'esprit humain prompt à s'abriter derrière le principe de précaution, tendance que seuls des esprits pionniers, des concertations continues, puis des démonstrations indiscutables pourront infléchir.

Néanmoins, les recommandations suggérées dans les Livrets 1 à 8 et synthétisées dans ce Livret 9 de conclusions, si elles sont appliquées, sont à même de rendre envisageables des scénarios ne comportant qu'un seul pilote en fonction à bord de l'avion à l'horizon 2050.

Beaucoup d'entre elles restent néanmoins pertinentes si l'analyse économique devait conduire à rejeter ou retarder ces scénarios, et à conserver encore longtemps les équipages à deux pilotes que nous connaissons aujourd'hui. Elles contribueraient alors significativement à la poursuite de l'amélioration de la sécurité du transport aérien, qui demeure avec l'aspect économique la principale motivation pour l'extension des automatismes dans le monde aéronautique.